

Trabajo de Fín de Máster

## **Master en Ingeniería de Automoción**

Malladores aplicados a supercomputación

### **MEMORIA**

**Autor:** Lenin Vicuña Criollo  
**Director:** Emilio Hernández Chiva  
**Convocatoria:** Octubre, 2017



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resumen

En el proyecto que se presenta a continuación, se describe el proceso de obtención de una malla que se utilizará en una simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) de tipo LES (Large Eddy Simulation) con tratamiento explícito. El modelo utilizado para la obtención de la malla se trata una geometría compleja, como es la carrocería de un vehículo.

Los contenidos que se exponen incluyen una explicación de los fundamentos teóricos de dinámica de fluidos que orientaron la creación de la malla, así como también de los términos y definiciones que son comunes dentro de la práctica de mallado.

El proceso de mallado esta detallado dos secciones, considerando creación de la malla de superficie y volumen por separado, en ellas se explican los parámetros de control y los criterios de evaluación de la malla, y se comenta las decisiones que se tomaron para corregir defectos que se presentaron. A demás, se muestran dos mallas de superficie obtenidas con métodos y elementos de mallado diferentes, que fueron generadas con programas distintos, con el propósito de visualizar las ventajas de utilizar el método de mallado.

Y por último se muestran estadísticas de los criterios de calidad de la malla obtenida y la evaluación correspondiente, en función de los fundamentos y criterios planteados.



# Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>3</b>
<b>1. PREFACIO</b>	<b>7</b>
1.1. Origen del proyecto .....	7
1.2. Motivación .....	7
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
2.1. Objetivos del proyecto .....	9
2.2. Abasto del proyecto .....	9
<b>3. CFD</b>	<b>11</b>
3.1. Introducción .....	11
3.1.1. Como herramienta en la investigación .....	11
3.1.2. Como herramienta de diseño .....	12
3.1.3. Aplicación en Automoción .....	13
3.2. Simulaciones en CFD .....	15
3.2.1. DNS (Direct Numerical Simulation) .....	15
3.2.2. RANS (Reynolds-Avaraged Navier-Stokes) .....	15
3.2.3. LES (Large Eddy Simulation) .....	15
3.3. Malla .....	16
3.3.1. Clasificación .....	17
3.3.2. Elementos de la malla .....	18
3.3.3. Requisitos de mallado en CFD .....	20
3.3.3.1. Refinamiento .....	20
3.3.3.2. Tamaño de elemento .....	21
3.4. Calidad de Malla .....	23
<b>4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO</b>	<b>25</b>
<b>5. MALLA DE SUPERFICIE</b>	<b>27</b>
5.1. Términos utilizados .....	27
5.2. Introducción al mallado de superficie .....	28
5.3. Parámetros de mallado .....	28
5.3.1. Basic .....	29
5.3.2. Perimeters .....	30
5.3.3. Features .....	33

5.4. Cut Zone .....	34
5.5. Criterios de calidad .....	36
5.5.1. Skewness .....	36
5.5.2. Warping .....	36
5.5.3. Min angle, Max angle .....	36
5.5.4. Herramientas para mejorar la calidad de la malla .....	37
5.5.4.1. Fix Quality .....	37
5.5.4.2. Reconstruct .....	38
5.5.4.3. Reshape .....	38
5.6. Aplicaciones de mallado de superficie .....	40
5.6.1. Tamaño de elemento .....	40
5.6.2. Control de mallado en superficies curvas .....	42
<b>6. MALLADO DE VOLUMEN .....</b>	<b>53</b>
6.1. Introducción al mallado de volumen .....	53
6.2. Layer mesh .....	53
6.2.1. Parámetros Básicos .....	53
6.2.1.1. Control del tamaño .....	54
6.2.1.2. Zonas Conflictivas .....	54
6.2.2. Side treatment .....	56
6.2.3. Vector treatment .....	57
6.2.4. Growth control .....	58
6.3. Volume Mesh .....	58
6.3.1. Volume mesh parameters .....	59
6.3.1.1. Parámetros básicos .....	59
6.3.1.2. Fix Quality .....	59
6.4. Criterios de calidad de la malla .....	60
6.4.1. Skewness .....	60
6.4.2. Squish .....	60
6.4.3. Min & Max angle .....	60
6.4.4. Element length .....	61
6.4.5. Negative volumen .....	61
6.5. Aplicaciones de mallado en el modelo .....	62
6.5.1. Parámetros de mallado .....	62
6.5.2. Tratamiento en áreas problemáticas .....	63
6.5.3. Resumen de calidad .....	64
6.5.4. Advanced Layer .....	68

<b>7. ANÁLISIS DE LA MALLA</b>	<b>72</b>
7.1. Malla de superficie.....	72
7.1.1. Tamaño de elemento .....	74
7.1.2. Criterios de calidad .....	74
7.1.2.1. Shell Skewness Quality EQUIAREA SKEWNESS [FLUENT] .....	75
7.1.2.2. Max. Angle Tria(s) Quality Trias > Maximum EQUIANGLE SKEWNESS [FLUENT] .....	76
7.1.2.3. Shell Minimum Length Quality .....	77
7.2. Malla de volumen .....	78
7.2.1. Tamaño de elementos .....	78
7.2.2. Parámetros de Calidad .....	78
7.2.2.1. Solid Skewness (Tetras only) Quality EQUIVOLUME SKEW. [FLUENT].....	79
7.2.2.2. Solid Squish Quality SQUISH.....	80
7.2.2.3. Max. Angle Penta(s) Quality.....	81
7.2.2.4. Solid Minimum Length Quality.....	82
<b>8. PRESUPUESTO</b>	<b>87</b>
<b>9. IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>89</b>
<b>10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES</b>	<b>91</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>93</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>95</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>97</b>
Referencias bibliográficas.....	97





# 1. Prefacio

## 1.1. Origen del proyecto

Este proyecto tiene su origen en el departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción del ETSEIB, a través del profesor Emilio Hernández Chiva, en conjunto con el Departamento de Aplicaciones Computacionales para la Ciencia y la Ingeniería (CASE) del Centro Supercomputación de Barcelona (BSC). Por medio de esta colaboración se propuso, en el banco de proyectos de la escuela, evaluar malladores para obtener formas de una carrocería de un vehículo real utilizando las instalaciones y recursos del BSC

## 1.2. Motivación

La simulación, actualmente es una herramienta fundamental en los centros investigación y de desarrollo de productos, que ha revolucionado el estudio de distintos fenómenos, como es el caso de la dinámica de fluidos. Las simulaciones CFD, por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics), tienen potencial en distintos ámbitos de la ingeniería, como es el caso de la industria de la automoción, debido a que esta herramienta permite simular fenómenos complejos interesantes, como la turbulencia.

El estudio de este fenómeno es muy importante para comprender el comportamiento del aire alrededor del vehículo, y al día de hoy se puede simular gracias a que en los últimos años se ha incrementado la capacidad de los ordenadores con métodos cálculo cada vez avanzados, lo que hace posible obtener simulaciones más complejas y precisas, como es el caso de las simulaciones LES, por sus siglas en inglés (Large Eddy Simulation).

Tradicionalmente, en la automoción, las simulaciones RANS (Reynolds-Avaraged Navier-Stokes) son utilizadas ya que estas permiten obtener las fuerzas aerodinámicas, de manera rápida y confiable, pero su aplicación es limitada debido a que con ellas se obtiene una solución estacionaria representativa del flujo principal. Esto ha provocado que el interés por la simulación LES se incremente en la actualidad por su capacidad de obtener una solución transitoria del flujo.

Para poder realizar simulaciones de este tipo se requiere una representación discretizada del dominio (malla), y esta a su vez, ser evaluada de acuerdo a los requerimientos que exige el tipo de simulación y el coste computacional que implica.



## 2. Introducción

### 2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es obtener una malla de un vehículo real, a través de un software de mallado comercial, con el propósito de ser utilizada en una simulación LES con tratamiento explícito. Para conseguir esto, se requiere los siguientes objetivos específicos.

- Aprender a utilizar el software comercial de mallado, y aplicar los conceptos de mallado específicamente en una geometría de un vehículo, en este caso un Koenigsegg Regera, para realizar simulaciones CFD.
- Generar una malla que considere los requisitos de la simulación LES y el coste computacional.
- Evaluar la malla en términos de calidad de elementos.
- Tomar acciones correctivas de acuerdo a los criterios de evaluación.

### 2.2. Abasto del proyecto

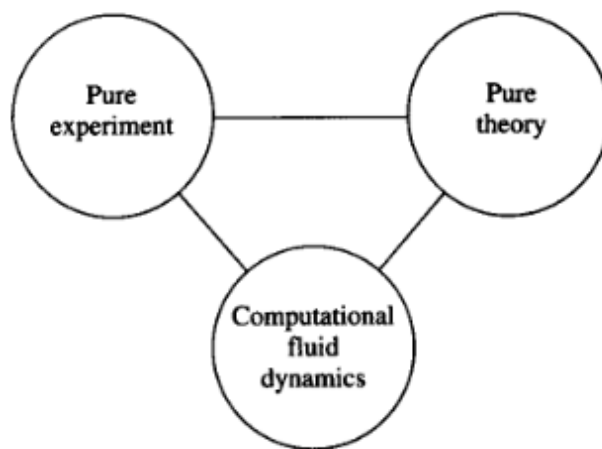
El proyecto se sitúa en el apartado de pre-proceso dentro de la simulación numérica, y utiliza una geometría que ya ha sido utilizada previamente para realizar mallado en CFD, y con ella se propone una malla que permita la realización de la simulación LES.



## 3. CFD

### 3.1. Introducción

El término “CFD” proviene de sus siglas en inglés (Computational fluid dynamics) y se refiere al campo de la ciencia que utiliza la simulación numérica para estudiar el movimiento de los fluidos. En la actualidad, gracias al incremento de las capacidades de los ordenadores y con ello la capacidad de resolver problemas físicos complejos con rapidez y precisión, se constituye en un pilar fundamental dentro del estudio del comportamiento de los fluidos.



**Figura 3.1.** Aspectos de la mecánica de fluidos. [1]

Por lo tanto, es una herramienta que, gracias a su capacidad de resolver fenómenos físicos complejos, se incorpora en las actividades, tanto de la investigación, como en desarrollo de nuevos productos dentro de las distintas ingenierías.

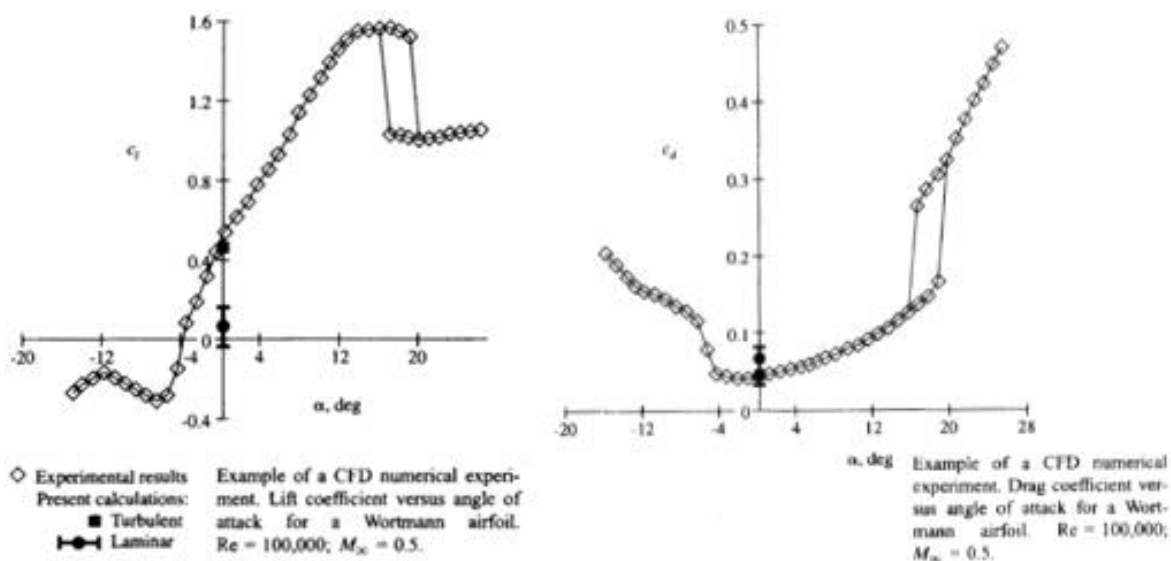
Sus aplicaciones dentro de la ciencia e ingeniería son diversas, por nombrar algunas:

- Climatología.
- Meteorología.
- Industriales.
- Aviación.
- Automoción.

#### 3.1.1. Como herramienta en la investigación

En la investigación ha contribuido a confirmar o a descartar hipótesis en investigaciones, en

la referencia [1] se hace menciona un ensayo realizado en un túnel de viento para determinar los coeficientes de sustentación y arrastre obtenidos en un perfil de ala con distintos ángulos de ataque, los resultados se muestran la figura 3.2 con cuadrados blancos. Además, se incluye el resultado de las simulaciones de flujo laminar que están representadas con el círculo negro y los corchetes, la amplitud de las fluctuaciones debido a la inestabilidad del flujo separado. En cambio, los cuadrados negros muestran el resultado de la simulación del flujo turbulento. Como se puede ver, la simulación del flujo turbulento concuerda con los valores obtenidos en el ensayo, lo que, en su momento, ayudo a aclarar incertidumbres que se tenían acerca del flujo alrededor del perfil.

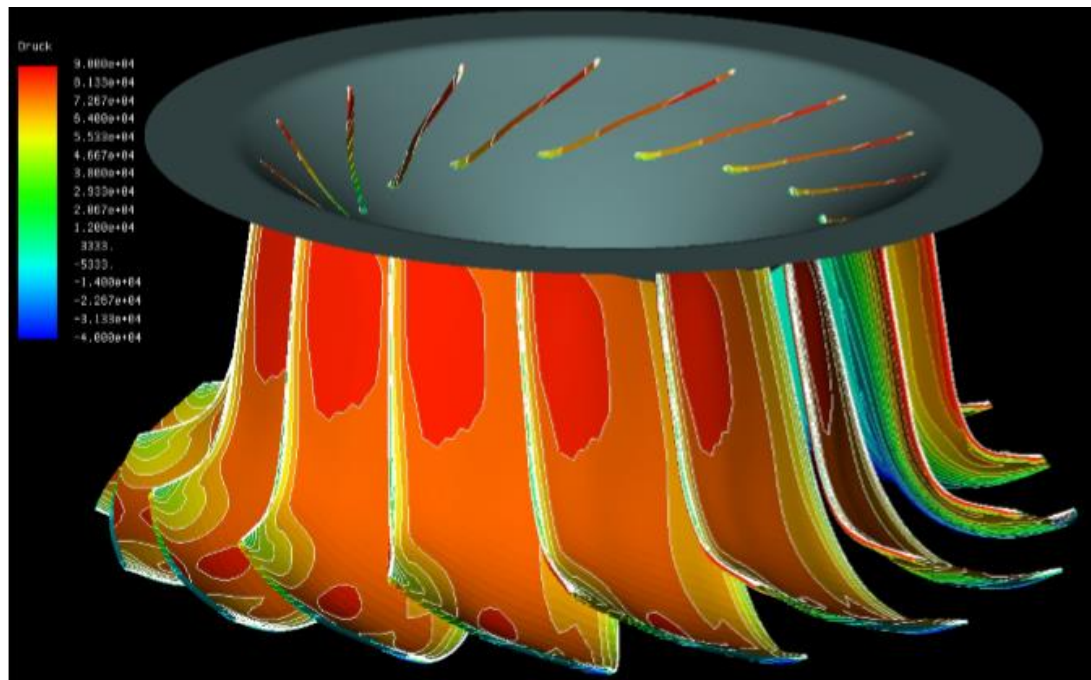


**Figura 3.2.** Coeficiente  $C_z$  y  $C_x$  de un perfil de ala con distintos ángulos de ataque. [1]

### 3.1.2. Como herramienta de diseño

Con la incorporación del cálculo de fluidos en los centros de desarrollo de productos, se pueden simular distintas alternativas de diseño antes de fabricar el prototipo final que se ensayará, por ejemplo; se pueden analizar distintas geometrías, y estudiar cómo influyen en el comportamiento de fluido, como por la tanto ayuda a reducir significativamente los costes de producto.

Un ejemplo de esta práctica se encuentra en la referencia [8], en ella se explica cómo se utilizó la simulación numérica para estudiar el flujo en el interior de una turbina utilizada para generar electricidad, la figura 3.3, que se muestra a continuación, muestra la distribución de la presión sobre la superficie de la turbina, para más detalles se puede consultar la referencia.



**Figura 3.3.** Simulación del flujo en el interior de una turbina [8].

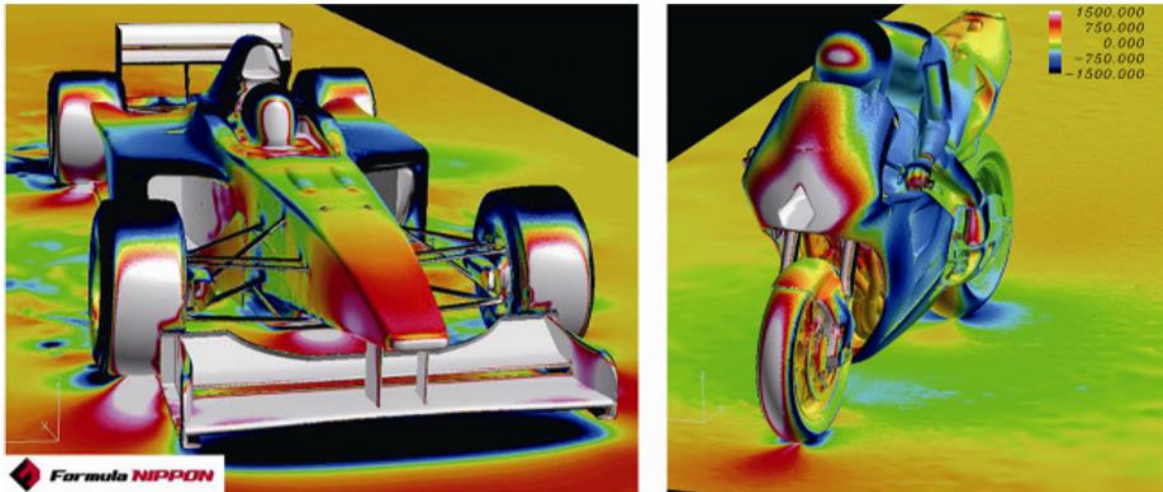
Gracias a la simulación, se pudo simular nuevas geometrías de la turbina, con lo que se consiguió incrementar la potencia de salida del generador de electricidad de 30 % y reducir las vibraciones que se producían en su funcionamiento.

### 3.1.3. Aplicación en Automoción

Como ya mencionamos, la automoción es otra industria donde se utiliza la simulación numérica como herramienta de diseño e investigación, en este caso, nos referimos a la aplicación de métodos numéricos aplicados en la aerodinámica de los vehículos.

La figura 3.4 es parte de la referencia [11], que explica la aplicación de CFD en esta industria. Concretamente se refiere a la utilización de métodos numéricos en centros de supercomputación para realizar simulaciones transitorias de turbulencia. Gracias a los centros de supercomputación, por su elevada capacidad de realizar cálculos, se puede realizar simulaciones de fenómenos complejos, como lo es la turbulencia, con geometrías complejas en dominios grandes.

En esta referencia, se lleva a cabo una simulación de turbulencia “LES” en vehículos, y en ella se explica que se consiguió predecir el coeficiente de sustentación con un margen del 1% en comparación al obtenido en el túnel de viento.



**Figura 3.4.** Distribución de presiones en la superficie de un vehículo de F1 y motocicleta [11]

Dentro de la experimentación, en la automoción, los túneles de viento en los que se controlan todas las condiciones han sido durante bastante tiempo la principal herramienta para el estudio del comportamiento de flujo alrededor de la carrocería, esto tiene limitaciones que se deben mencionar.

Primero, realizar ensayos con vehículos a escala 1:1 hace que el ensayo sea demasiado costoso, debido a que fabricar el prototipo es bastante complicado, en muchas ocasiones se utilizan piezas fabricadas por métodos artesanales, ya que no se cuenta con líneas de producción, ni con utillajes que faciliten la fabricación de la pieza, siendo una práctica habitual realizar los ensayos a escala reducida para conseguir que las dimensiones del prototipo se reduzcan y con ello reducir los costes del ensayo. Esto, aunque ayuda de manera significativa, no reproduce las mismas condiciones que se tienen en la realidad, con lo cual es una ayuda muy limitada.

Además, las paredes y el suelo estacionario del túnel influyen en el ensayo, lo que hace que el ensayo no considere todas las condiciones que en realidad tiene un vehículo. Esto es debido que tanto las paredes como el suelo no se mueven, y por tanto las ruedas tampoco, por lo que el comportamiento del flujo será distinto.

A esto se suma el hecho que el tiempo con el que se cuenta para el proceso de diseño debe ser optimizado, por lo tanto, la simulación numérica o “CFD” se convierte en una herramienta valiosa dentro de los centros de desarrollo.



## 3.2. Simulaciones en CFD

La principal preocupación dentro de la simulación de fluidos, es la turbulencia, y de acuerdo al tratamiento que se le dé a esta se puede obtener mucha información acerca del flujo. Ahora bien, existe todo un mundo dentro de la simulación de fluidos, en el que se trata este tema con distintos modelos matemáticos y debido a que su estudio no se contempla dentro de los objetivos del proyecto, se comentará brevemente las siguientes:

### 3.2.1. DNS (Direct Numerical Simulation)

Se trata de la solución numérica de la ecuación de Navier-Stokes para todas las escalas de movimiento a números de Reynolds bajos. Por esto, no se suele utilizar para resolver problemas comunes de ingeniería, ya que requieren recursos que en la actualidad solo se puede obtener en ciertos centros de computación, aplicándose específicamente en investigaciones.

### 3.2.2. RANS (Reynolds-Avaraged Navier-Stokes)

Es considerada una solución estacionaria de flujo y se refiere a la solución promediada de las ecuaciones de Navier-Stokes. En la industria es conocida ampliamente, y se está incluida en todos los programas de simulación de fluidos, y gracias a esta se puede obtener los coeficientes aerodinámicos, ya sean  $C_x$ ,  $C_y$  y  $C_z$ , y fuerzas que actúan sobre el cuerpo con rapidez, debido a las simplificaciones que se realizan.

### 3.2.3. LES (Large Eddy Simulation)

La simulación de estructuras turbulentas grandes, es una solución intermedia entre las dos anteriores, las estructuras grandes son resueltas directamente y el resto son promediadas. Es un método llamativo, ya que los resultados, producto de estas simulaciones, pueden brindarnos información valiosa que ayudara a profundizar los conocimientos sobre el flujo alrededor de los vehículos.

La resolución que se necesita en este tipo de simulaciones también produce cuestionamientos acerca de la aplicación de esta herramienta, ya conlleva requisitos del tamaño de elementos en la malla del modelo, que hace que el número de elementos sea elevado cuando se trata de simulaciones de geometrías complejas. La capacidad de los ordenadores de los centros de cómputo actuales motiva a realizar simulaciones de este tipo para resolver el flujo alrededor de un vehículo, por tal motivo se propone en este proyecto obtener una malla que sirva en este tipo de simulaciones.

Para demostrar el interés en el mundo de la simulación en este tipo de simulaciones, se

recomiendan las referencias [12], [14] y [17]. En ellas se explica la aplicación de LES dentro de la automoción.

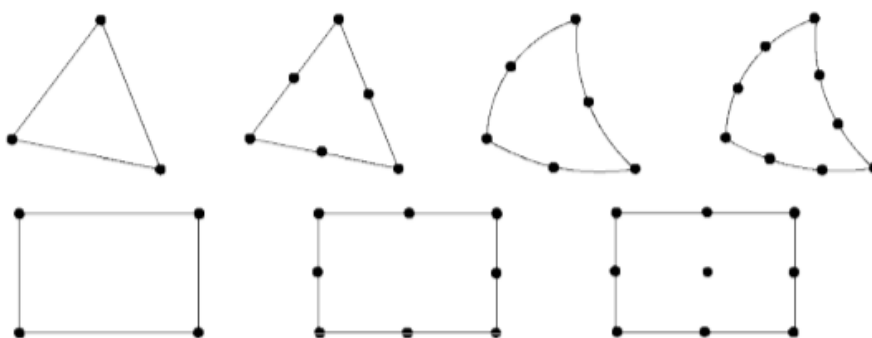
La referencia [12] trata sobre la aplicación de LES en la aerodinámica vehicular, en ella se muestran los resultados de simulaciones de este tipo. Al principio se muestra la simulación del flujo del aire alrededor de las ruedas y los pasos de ruedas. El segundo, trata sobre la simulación de vehículos en condiciones de ráfagas de viento.

La referencia [14] explica la simulación LES de un modelo de camión, representado mediante una geometría simplificada para evitar detalles de la carrocería del mismo, para ello se ha preparado dos modelos, uno con filos acusados en la cabina, y el segundo aristas redondeadas.

La referencia [17], se trata de la simulación de vehículo de competencia en viento cruzado.

### 3.3. Malla

Este término hace refiere a la representación discretizada del dominio, es decir representar la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado con un número finito de elementos, donde se realizarán los cálculos de velocidad, presión y densidad para representar el movimiento del fluido. Si se trata el problema en una sola dimensión, una malla está compuesta por segmentos. Si se estudia el fenómeno en dos o tres dimensiones, esta puede estar compuesta por elementos de distintas geometrías, por ejemplo; triángulos, cuadriláteros, prismas y tetraedros, en sus dimensiones respectivas. La figura 3.5, muestra algunos ejemplos de elementos que se pueden utilizar en la confección de una malla de superficie.

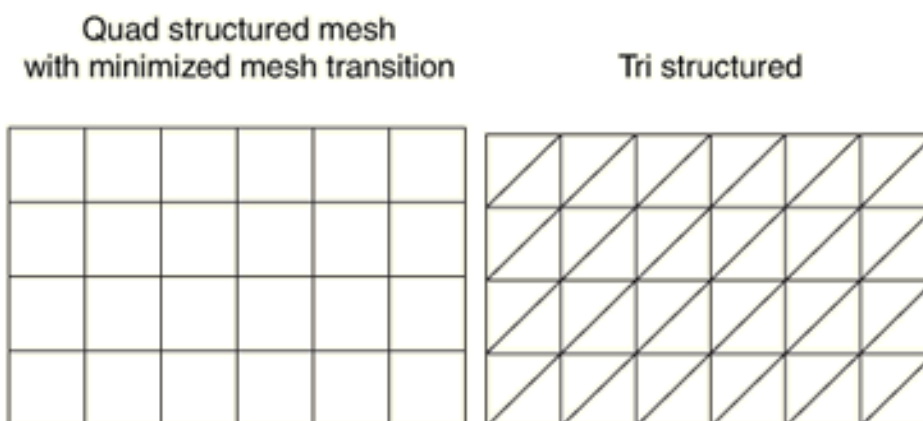


**Figura 3.5.** Ejemplos de elementos finitos. [15]

### 3.3.1. Clasificación

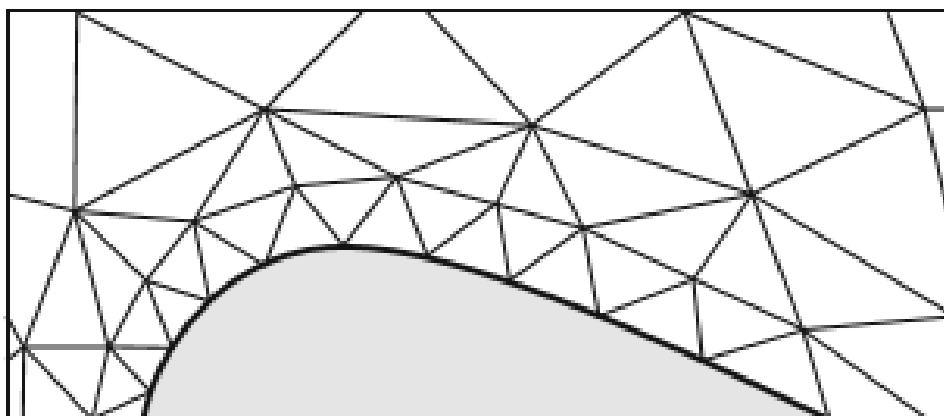
De acuerdo a su conectividad, se clasifican en mallas estructuras y no estructuradas.

La referencia [13] define a las mallas estructuradas como aquellas en las que cada nodo se relaciona con número igual de vecinos. En dos dimensiones puede estar compuesta por triángulos o cuadriláteros, además de una combinación de ambos.



**Figura 3.6.** Ejemplo de malla estructurada

Por otro lado, en las mallas no estructuradas el número de conexiones que tiene un nodo con sus vecinos es variable. El posicionamiento de los nodos, así como conectan entre sí, se realiza de acuerdo a distintos métodos, por ejemplo, Quadtree, Advancing-front technique y Delauney technique [15], por mencionar algunos.



**Figura 3.7.** Ejemplo de malla no estructurada [9].

El uso de un tipo de malla u otro dependerá de diversos factores y en general no se puede decir que uno es mejor. De acuerdo al método de cálculo que se emplee, ya sean estos; método de diferencias finitas, volúmenes finitos o elementos finitos, se utilizará un tipo de

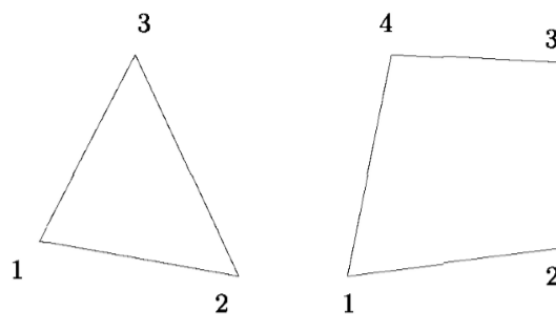
mallas. El método de diferencias finitas requiere el uso de mallas estructuradas, en cambio; tanto el método de volúmenes finitos como el de elementos finitos permiten el uso de mallas no estructuradas.

Si se considera la complejidad de la geometría que se desea representar, las mallas no estructuradas son más flexibles el momento de realizar el proceso de mallado, y capturan mejor la geometría. Por otro lado, si se toma en cuenta el cálculo numérico, las mallas estructuradas logran altos grados de precisión y se resuelven en menos tiempo.

### 3.3.2. Elementos de la malla

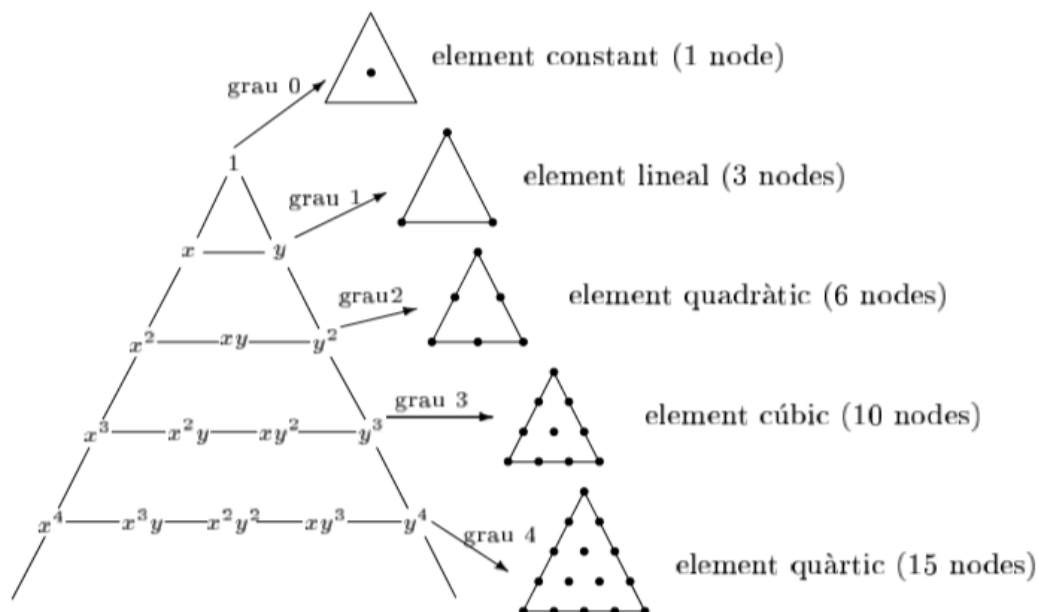
Son los elementos básicos de la malla, están compuestos por nodos, segmentos y vértices que definen su geometría.

En mallas de superficies se utilizan elementos con geometrías en 2-D, en este caso triángulos y cuadriláteros.

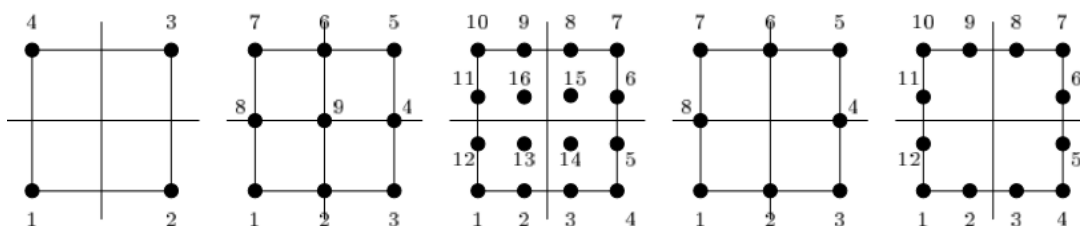


**Figura 3.8.** Elementos de superficie. [15]

Cuando los nodos se encuentran en los vértices de los elementos, se denominan elementos lineales, término que se refiere al grado de interpolación. El grado de interpolación de los elementos puede aumentar, y con ello el número de nodos, como se puede apreciar en las figuras 3.9 y 3.10, se muestran los tipos utilizados, tanto para triángulos como para cuadriláteros.

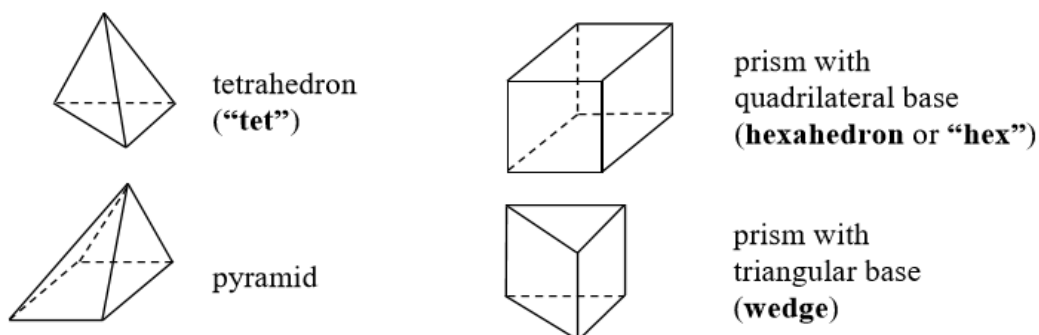


**Figura 3.9.** Tipos de triángulos de acuerdo al grado de interpolación [13]



**Figura 3.10.** Tipos de cuadriláteros de acuerdo al grado de interpolación [13]

Por otro lado, los elementos utilizados en mallas para representar volúmenes, nacen de los posibles elementos que se pueden generar a partir los elementos en 2-D, es decir; triángulos y cuadriláteros. Por lo tanto, los elementos que se pueden generar son, tetraedros, pirámides, prismas y hexaedros.

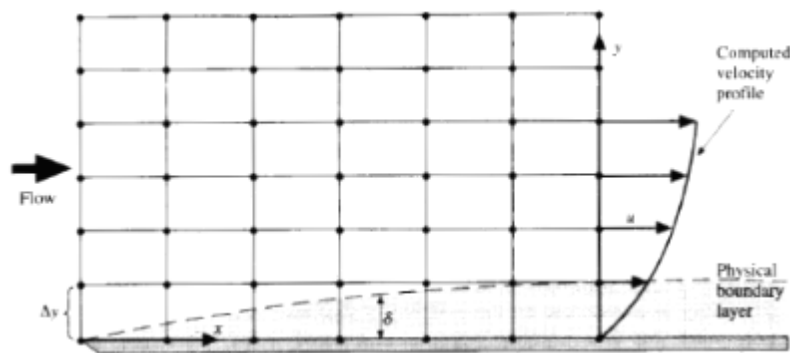


**Figura 3.11.** Elementos para representar volúmenes [2].

### 3.3.3. Requisitos de mallado en CFD

#### 3.3.3.1. Refinamiento

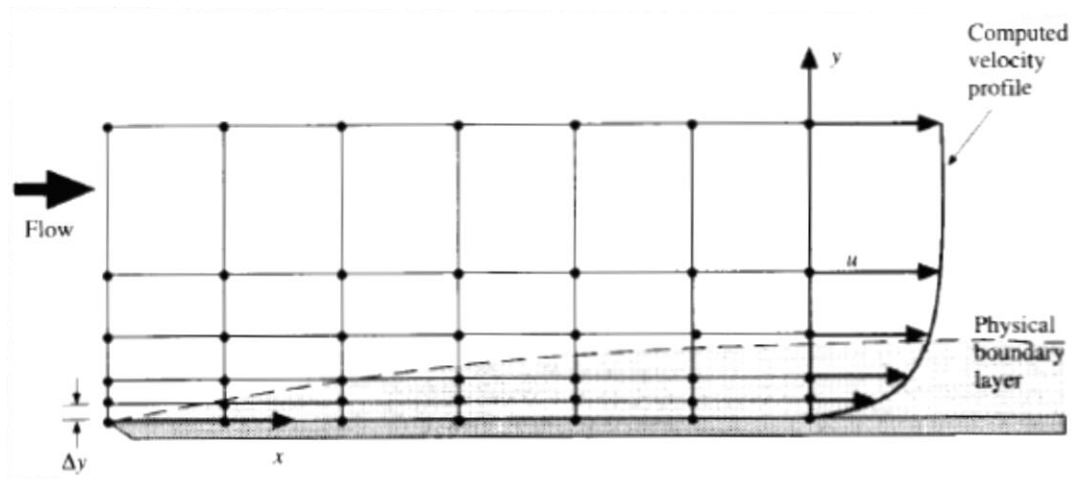
Para explicar la necesidad del refinamiento de la malla, se propone el ejemplo de un fluido viscoso sobre una placa plana como el que se muestra a continuación, en la figura 3.12 se puede ver la formación de la capa límite cuyo espesor  $\delta$  aumenta a medida que se avanza en la dirección del flujo.



**Figura 3.12.** Refinamiento cerca de la superficie [1].

Si se considera malla representada en la figura 3.12, donde  $\Delta y \geq \delta$ , es decir ninguno de los nodos está situado en el interior de la capa límite, cuando se realice el cálculo con la condición de que no existe deslizamiento en la superficie, se obtiene un perfil de velocidades como el que se muestra a la derecha del gráfico, en el que se muestra el aumento de la velocidad del flujo a medida que se aleja de la superficie de la placa. Este perfil indicaría un espesor de la capa límite mayor que el real, por lo tanto, el fenómeno simulado con esta malla no es apropiado.

Sin embargo, si para el mismo ejemplo se considera una malla con el mismo número de nodos, pero distribuidos de manera tal que  $\Delta y < \delta$ , como la que se muestra a continuación, el perfil de velocidades obtenido en el cálculo es una representación más aproximada del fenómeno.



**Figura 3.13.** Refinamiento cerca de la superficie [1].

Por lo tanto, la esencia del refinamiento es aumentar la cantidad de nodos en las regiones donde se producen grandes cambios en las propiedades del fluido y disminuir el número de nodos donde no es necesario, consiguiendo aumentar la precisión de la simulación. Debido a la relación de aspecto que tienen los elementos, se dice que son elementos anisótropos, y aumentarán su tamaño en la dirección normal a la superficie con un factor de crecimiento dado.

### 3.3.3.2. Tamaño de elemento

Ahora bien, ya que se ha aclarado la necesidad de estrechar los nodos en la región cerca de la superficie y que mientras más nodos coloquemos en esta región, más aproximada será la simulación, se debe mencionar que existen otros factores que condicionan el tamaño del elemento.

Uno de ellos es el método elegido para resolver el sistema de ecuaciones, ya que este influirá en el paso de tiempo de la simulación.

De forma general, los métodos que se utilizan para resolver los sistemas de ecuaciones pueden ser clasificados en dos enfoques; implícitos y explícitos. Dentro de los objetivos del proyecto no se contempla el estudio de ellos, pero se debe comentar que cuando se resuelven estos sistemas, se considera el criterio de estabilidad y este influye de forma distinta dependiendo del método elegido.

La referencia [1] explica que en los métodos explícitos el criterio de estabilidad considera la relación entre  $\Delta t$  y  $\Delta x$ , para que la propagación del error en el cálculo de se mantenga dentro de un margen que no afecte la resolución de las ecuaciones. Por lo tanto, cuando se simula un flujo por un tiempo dado, el paso de tiempo en el que se subdivide la simulación, ó  $\Delta t$ , está

condicionado por  $\Delta x$  para que la resolución numérica sea estable, es decir,  $\Delta t$  no puede ser superior al límite impuesto por este criterio. En muchos casos los valores de  $\Delta t$  deben ser bajos para que la solución sea estable, y por tanto el coste computacional sube.

Otro factor, es la estimación de los resultados de la simulación numérica.

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial n}$$

Donde:

- $\nu$ , Viscosidad cinemática.
- $u_\tau$ , velocidad de fricción.
- $\tau_w$ , Tensión cortante.
- $y^+$ , Sirve para evaluar la resolución de la malla en la dirección vertical a la superficie, es un valor adimensional que indica la altura a la que se debe situar el primer nodo a partir de la superficie.

De igual manera, se evalúa la resolución de la malla para el resto de direcciones con:

$$\Delta f^+ = \frac{u_\tau \Delta f}{\nu}$$

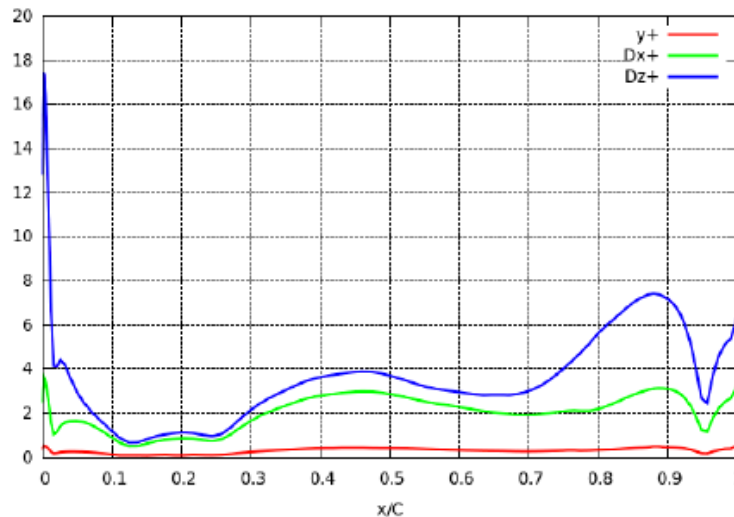
$\Delta f^+$ , donde  $f$ , puede ser las direcciones, X o Z. Siendo X, la dirección del flujo, y Z, la dirección paralela a la superficie y normal al flujo.

En la literatura se las puede encontrar también como:

- $\Delta s^+ = \Delta x^+$
- $\Delta n^+ = \Delta y^+$
- $\Delta l^+ = \Delta z^+$

La evaluación de estos valores, se realiza a lo largo de la superficie como se muestra en la figura.





**Figura 3.14.** Resolución de la malla.

A fin de representar las estructuras que están en la región cerca a la pared de manera precisa, en la referencia [7] se menciona que los valores deben ser, según (Piomelli & Chasnov 1996):

- $y^+ < 2$
- $\Delta x^+ = 50 - 150$
- $\Delta z^+ = 15 - 40$

### 3.4. Calidad de Malla

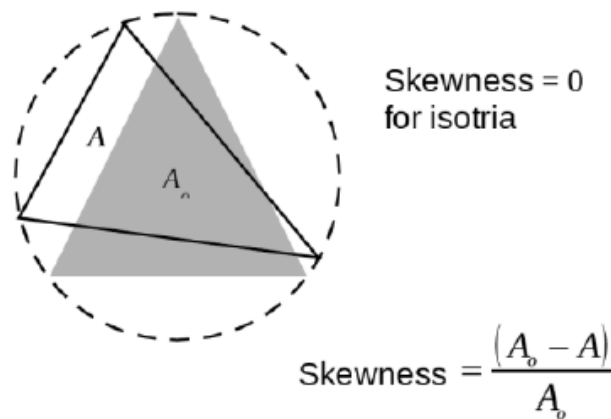
En referencia a la calidad de una malla existe mucha literatura y discusión al respecto sobre las características que debe tener una malla de buena calidad. De antemano se sabe que el propósito de la malla es ser utilizada para resolver un problema dado, por lo tanto, la bondad de esta será evaluada de acuerdo a la solución numérica que se puede obtener de ella, es decir, una malla que ayude a disminuir error del cálculo, para lo que es requiere una estimación del error de la simulación. Normalmente no se cuenta con dicha estimación, entonces se vuelve indispensable realizar la inspección de en términos de los índices calidad de los elementos de la malla, esto es, evaluar la forma geometría de los elementos de acuerdo a criterios de calidad, por ejemplo; aspect ratio, skewness, etc., y su cálculo se puede encontrar en los manuales de usuario de los programas de mallado o de simulación, la referencia [16], es un compendio de dichos criterios de calidad.

El cálculo de estos criterios es realizado por el software de mallado, en este caso ANSA, y se puede solicitar que se muestren en pantalla los elementos que incumplen los criterios de calidad, esto es de mucha ayuda cuando se cuenta con modelos complejos que contienen millones de elementos, como puede ser el caso de un vehículo completo.

En resumen, se puede decir que, establecer los criterios de calidad de los elementos, nos permite.

- Evaluar los resultados de la generación de malla.
- Detectar de forma automática defectos, por ejemplo, elemento invertidos, ángulos demasiado grandes o pequeños, etc.
- Realizar acciones de mejora de la malla a priori.

Un comentario importante referente a la determinación de los índices de calidad, es la determinación del límite a partir del cual un elemento debe ser rechazado. Por ejemplo, el cálculo de skewness de acuerdo al software Fluent, es el siguiente:



**Figura 3.15.** Cálculo del criterio Skewness.

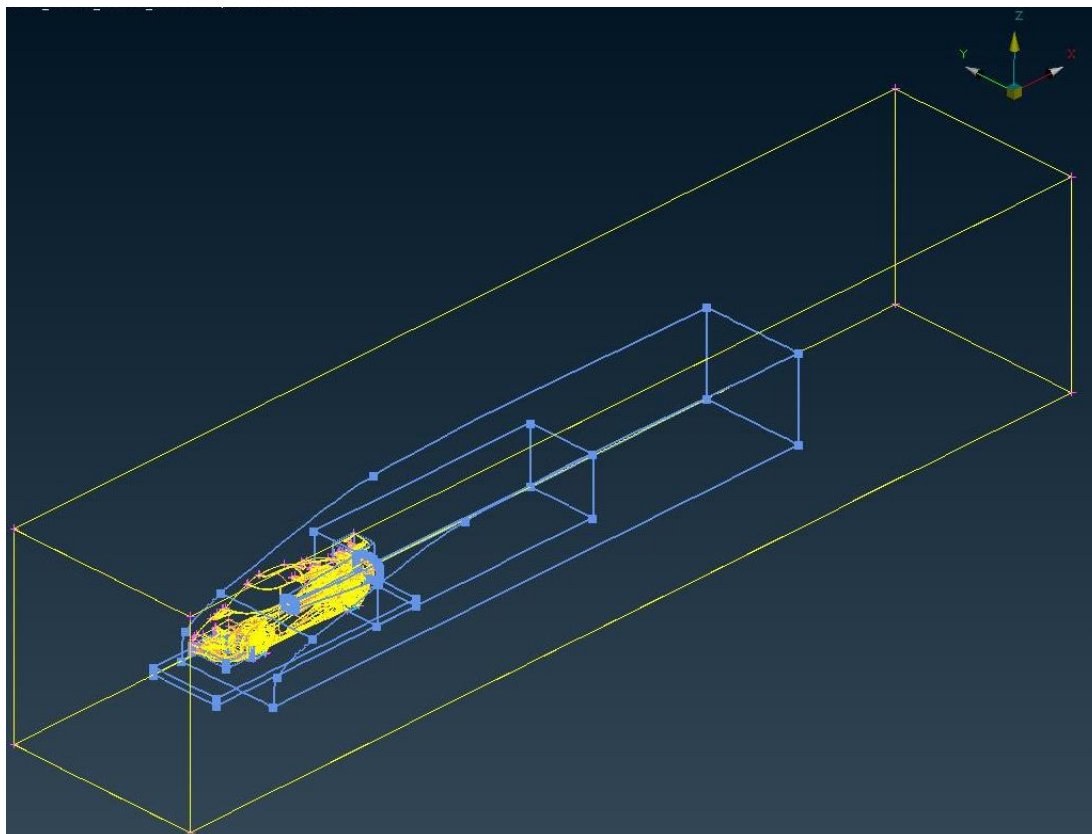
Donde, un triángulo equilátero presenta skewness igual a 0, que es el mejor elemento que se puede obtener, y 1 el peor elemento.

El valor a partir de cual deben ser rechazados los elementos no queda muy claro en la literatura, en la referencia [10] se menciona este aspecto, y a criterio del autor no existe justificación en base a un análisis matemático.

Para el presente proyecto, se recurrió a los criterios sugeridos por el software ANSA, en el que se establece los criterios de acuerdo a distintos programas de simulación numérica, por ejemplo, Open Foam o Fluent. La explicación de los criterios elegidos se muestra más adelante, en los apartados de mallado de superficie y volúmenes respectivamente.

## 4. Descripción del modelo











El modelo a mallar, está constituido por el vehículo y el túnel de viento, y para simplificar la simulación se utiliza la mitad del modelo completo aplicando simetría. La siguiente imagen muestra el área de trabajo



**Figura 4.1.** Modelo completo.

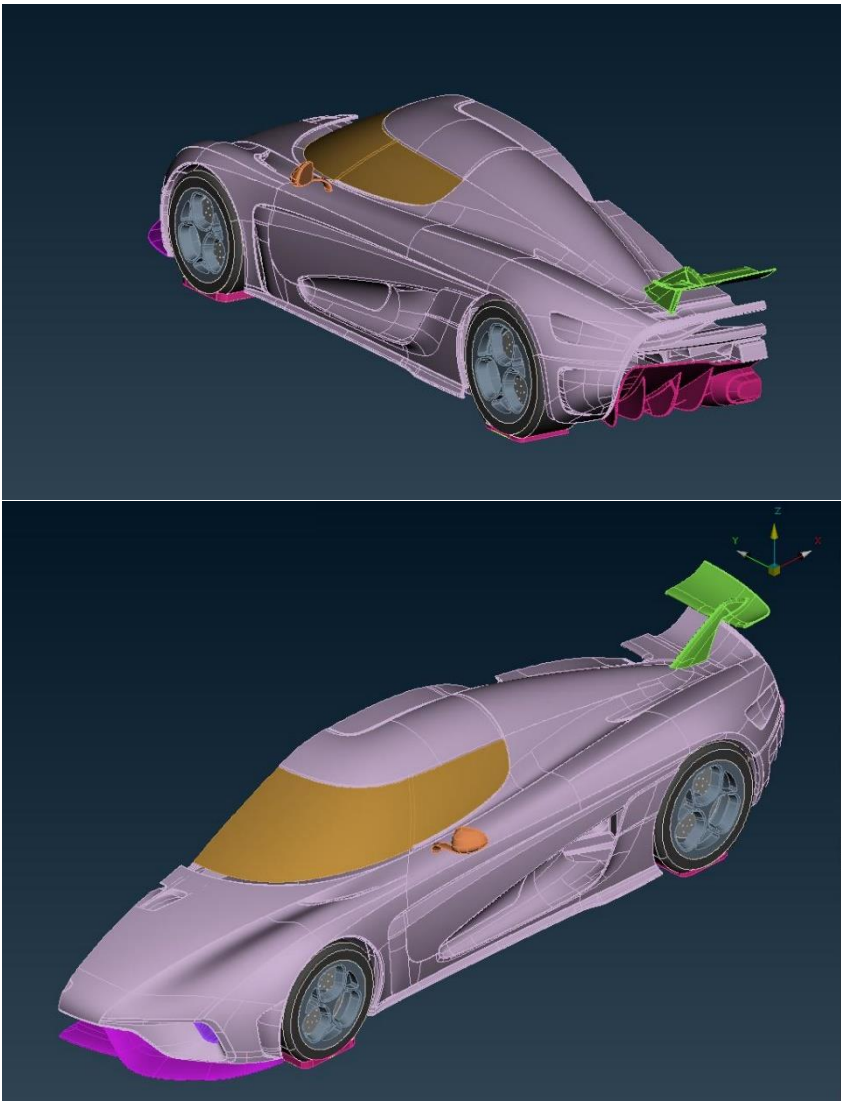
A demás de lo mencionado se distinguen líneas de color azul, el software tiene esta herramienta que se denomina “Size Box”, y permite controlar el tamaño máximo de los elementos en el interior de la zona delimitada por estas cajas. Estas están situadas en zonas donde se quiere que el crecimiento de los elementos no produzca elementos demasiado grandes, un ejemplo de esto es en la zona detrás del vehículo, donde se quiere controlar el tamaño de elementos para conseguir capturar la generación de vórtices.

El modelo del vehículo contiene las siguientes partes.

	7	body	wall
	8	splitter	wall
	9	wing	wall
	10	diffuser	wall
	11	duct	wall
	12	rearview	wall
	13	windshield	wall
	14	brake	wall
	15	rim	wall
	16	tyre	wall

**Figura 4.2.** Partes del vehículo que se incluyen

Estas las podemos identificar en la siguiente imagen.



**Figura 4.3.** Vehículo Completo.

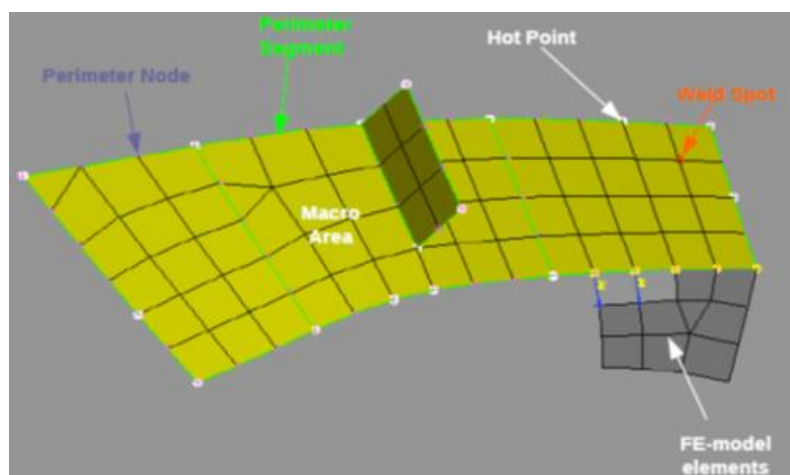
## 5. Malla de superficie

En este apartado se procede a explicar el proceso de mallado de la superficie con el software ANSA, y las herramientas específicas del programa que se utilizaron para obtener la malla de superficie del modelo.

Consta de las siguientes partes

- Parámetros de mallado
- Criterios de Calidad
- Herramientas de mejora de calidad
- Aplicación en la malla del vehículo

### 5.1. Términos utilizados



**Figura 5.1.** Representación de los términos del software. [6]

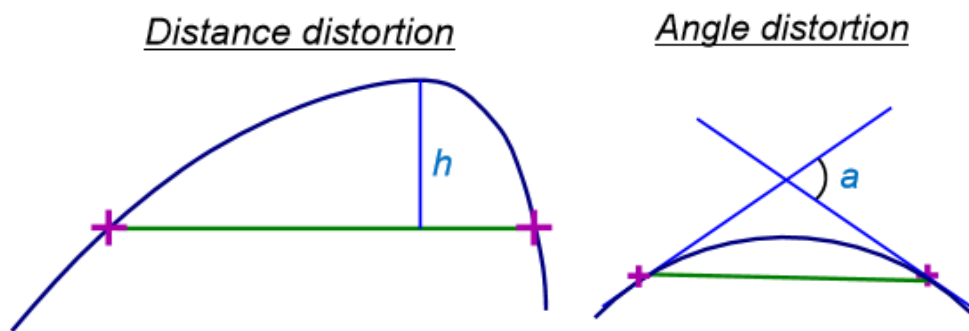
- Macro Area: Consiste en una o más caras unidas.
- Perimeter segment: Es la descripción discretizada de la geometría 3D, y también se constituyen en los límites de las macros. Se muestran de color verde
- Perimeter nod.
- Hot point: Se encuentran en los extremos de los perímetros. Se representan de color blanco.

## 5.2. Introducción al mallado de superficie

El número de nodos se puede controlar explícitamente indicando directamente el número de nodos y su distribución en un segmento, o implícitamente con el tamaño de elemento.

### Tamaño de elemento

De acuerdo al tamaño de elemento que se desea en la malla de superficie, la distorsión permite controlar el tamaño de elementos en superficies curvas, esta se puede expresar en términos de distancia o de ángulo. Esto permite capturar características de la superficie y evita que se realicen simplificaciones excesivas del modelo.



**Figura 5.2.** Representación del cálculo de distorsión. [6]

### Distancia de distorsión

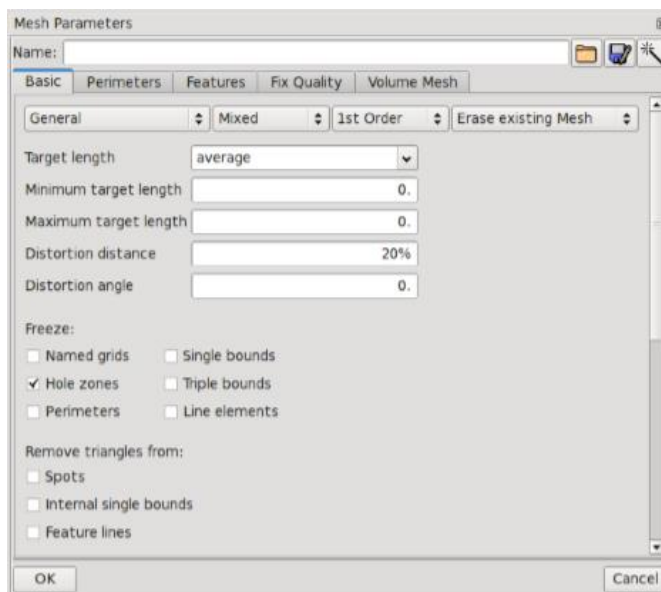
Se expresa en términos de porcentaje del tamaño del elemento local.

### Ángulo de distorsión

El ángulo, en grados, entre las tangentes de un segmento de dos nodos consecutivos.

## 5.3. Parámetros de mallado

Los parámetros que permiten controlar la generación de la malla se agrupan en 4 pestañas, como se ve en la siguiente imagen.



**Figura 5.3.** Parámetros de control básicos del mallado de superficie. [6]

### 5.3.1. Basic

Se refiere a los parámetros básicos, y cuenta con información que se describe a continuación.

- Tipo de Malla; General, CFD, STL, Solid Structural mesh.
- Tipo de elemento: Cuadrado, triángulo, mezcla de cuadrados y triángulos, o triángulos rectángulos (ortho tria).
- Orden de elemento: 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup>.

#### Tipo de malla

##### General

En este tipo de malla, los parámetros de control son básicos y permiten reducir o aumentar el tamaño del elemento de acuerdo a las características de la superficie.

- Target length
- Minimum target length
- Maximum target length
- Distortion: distance/angle

##### CFD

Por otro lado, en aplicaciones de mecánica de fluidos la generación de la malla requiere mayor control, por lo tanto, el software introduce nuevos parámetros que permiten controlar el

refinamiento de los elementos.

A los parámetros básicos que se menciona previamente, se suma el factor de crecimiento (growth factor), este relaciona el tamaño de elemento de dos elementos consecutivos.

Además, de acuerdo a características de la curvatura de la superficie, se realiza un refinamiento adicional que se controla mediante los siguientes parámetros.

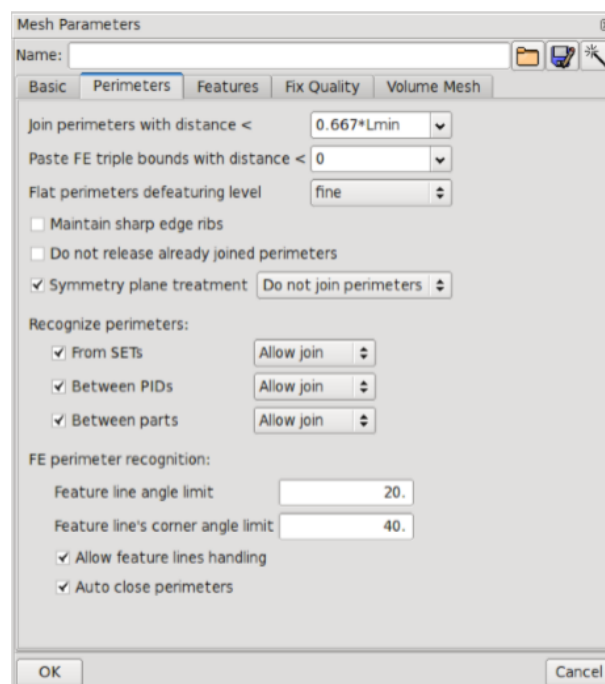
- Enhanced curvature sampling
- Additional convex curvature treatment
- Additional orientation based treatment

Y, por último, se puede realizar refinamiento en superficies que forman ángulos pronunciados mediante los siguientes parámetros.

- Sharp edges angle limit
- Trailing edges angle limit

### 5.3.2. Perimeters

Esta sección contiene información que permite al software detectar características importantes de la geometría y que deben ser respetadas más adelante cuando se realicen mejoras en la malla.

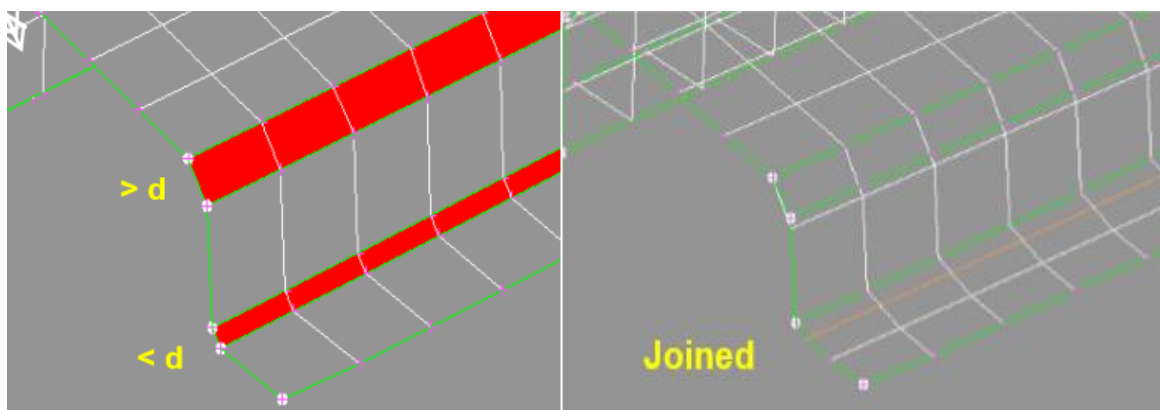


**Figura 5.4.** Parámetros de control de perímetros de la malla de superficie. [6]



**Join Perimeters with distance <**

Se refiere la distancia mínima entre segmentos que se debe mantener, dependiendo del tamaño mínimo de elemento introducido, la aplicación los unirá para simplificarlos o moverá los nodos para solucionar los inconvenientes.



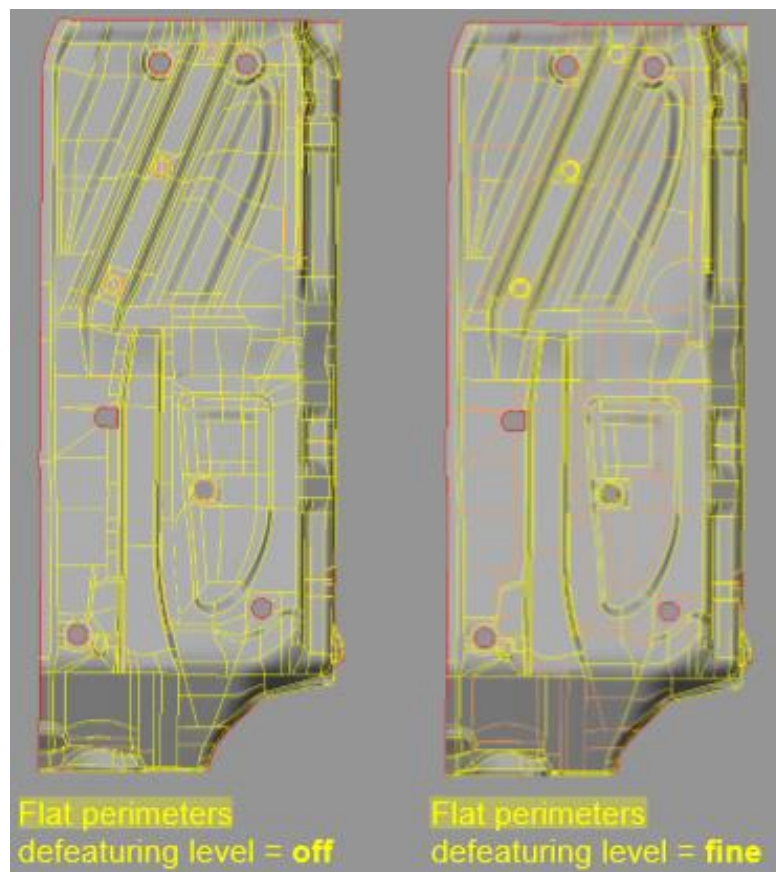
**Figura 5.5.** Distancia entre perímetros.

En la figura 5.5 se aprecia con la línea naranja los segmentos que fueron unidos, a diferencia de los segmentos de color blanco cuyos nodos fueron desplazados.

La distancia se puede expresar como un valor determinado, o una expresión en función del tamaño de elemento deseado.

**Flat perimeters defeaturing level**

La imagen a continuación muestra con líneas de color naranja las secciones que fueron simplificadas debido a que se encuentran en superficies planas, esta aplicación cuenta con varios niveles de acción.

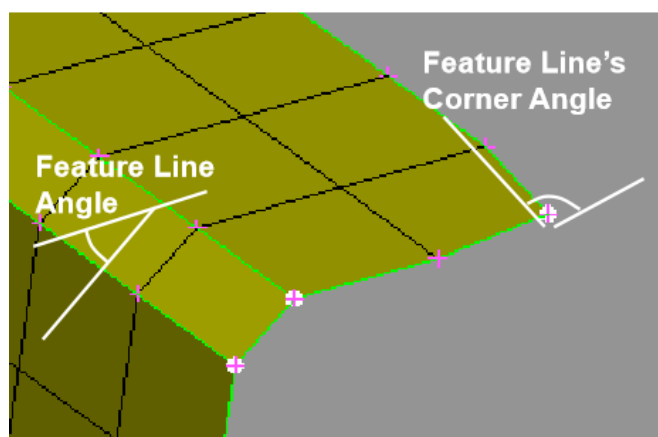


**Figura 5.6.** Simplificación de superficies planas. [6]

### FE perimeter recognition

Se necesitan especificar los siguientes ángulos.

- Feature line angle limit
- Feature line's corner angle limit

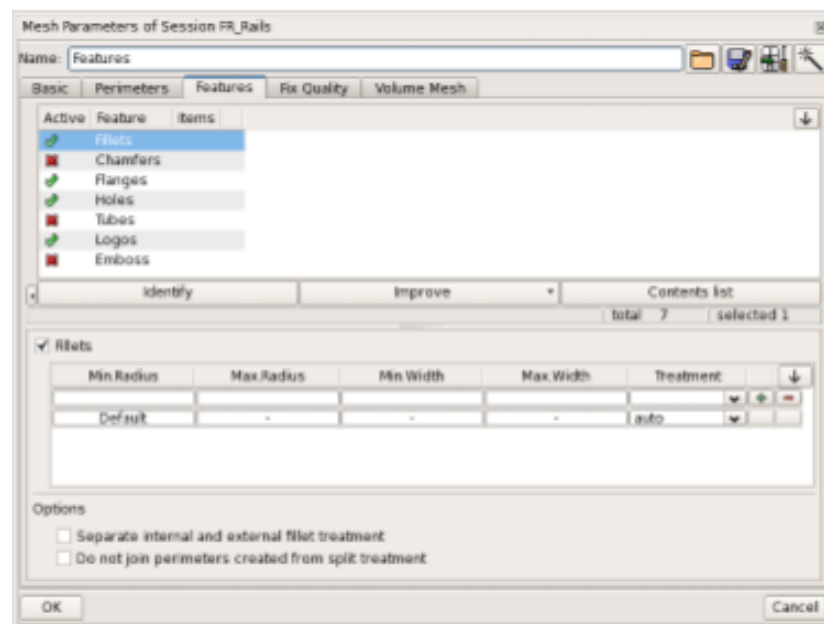


**Figura 5.7.** FE perimeter recognition. [6]

Al especificar estos ángulos, el software reconoce características importantes de la superficie y no realiza modificaciones, ni simplificaciones de la geometría, generalmente aumentar estos ángulos permite al software simplificar las superficies y mejorar la malla en términos de calidad, aunque se puede perder detalles del modelo.

### 5.3.3. Features

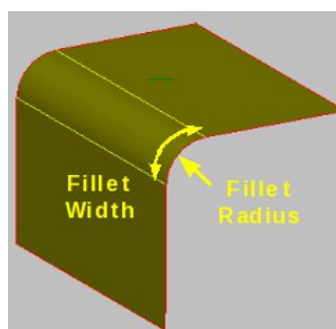
En esta pestaña se puede permitir al software reconocer distintas características del modelo y controlar el mallado en estas secciones.



**Figura 5.8.** Fillet Treatment. [6]

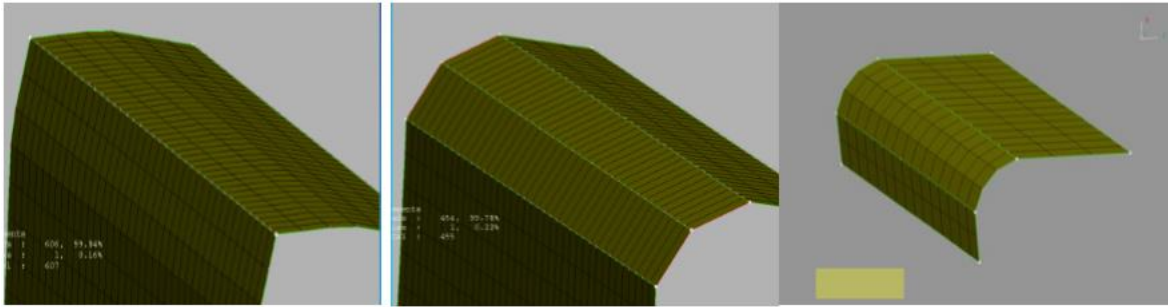
### Fillet treatment

Se considera una herramienta de gran ayuda que permite controlar la malla en esquinas redondeadas, estas son identificadas y agrupados de acuerdo al ancho y radio como se puede ver en la figura 5.9.



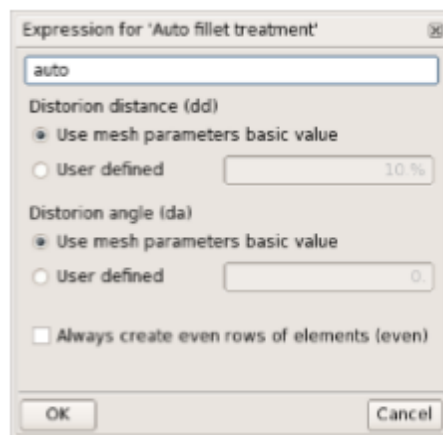
**Figura 5.9.** Reconocimiento, "Fillet treatment". [6]

Los posibles tratamientos son los siguientes:



**Figura 5.10.** Posibles tratamientos, “Fillet treatment”. [6]

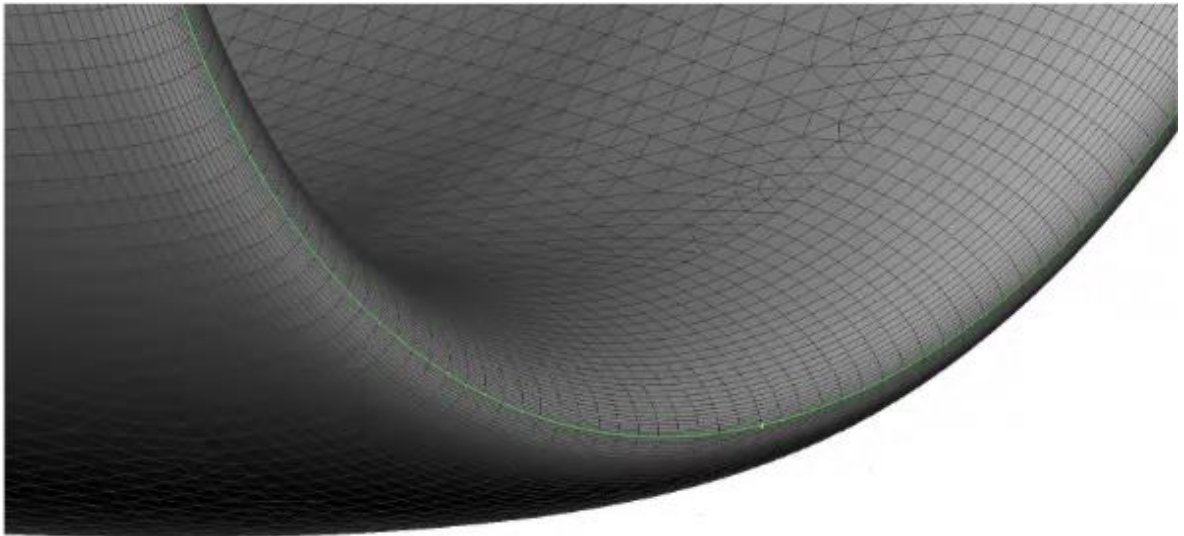
- **Sharpen:** Remplaza la cara redonda con dos caras que forman una esquina.
- **Split:** Divide la cara redonda por la mitad isoparamétricamente.
- **Element rows:** Se puede imponer el número de columnas de elementos.
- **Auto:** El programa calcula y asigna el número de columnas que mejor se acopla a la superficie de acuerdo al tamaño de elemento y distorsión que se desee.



**Figura 5.11.** Parámetros de control de distorsión, “Fillet treatment” [6]

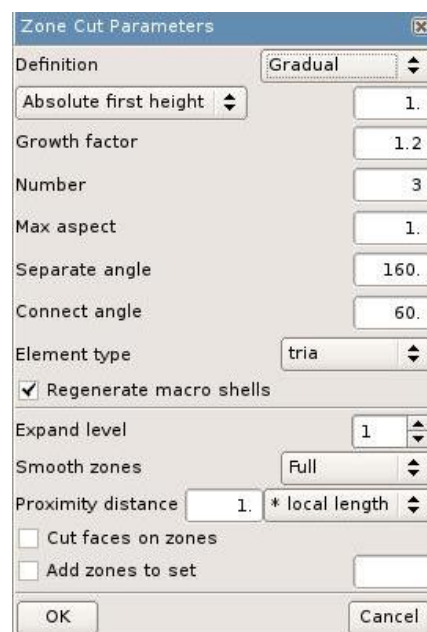
## 5.4. Cut Zone

De acuerdo a las especificaciones de resolución de la malla, existe la posibilidad que sea necesario utilizar elementos anisótropos, en algunas zonas del modelo, por ejemplo, el alerón. Esta opción permite generarlas, en la figura 5.12 se muestra un ejemplo de este tipo de mallas.



**Figura 5.12.** Ejemplo de malla con elementos anisótropos.

Esta herramienta realiza un remallado de superficie, y necesita especificar un perímetro a partir de cual se empezará a construir los elementos, en la figura 5.12 se muestra de color verde. A demás es necesario especificar parámetros como altura del primer elemento, factor de crecimiento, número de filas y tipo de elementos, todos se encuentran en la siguiente figura.



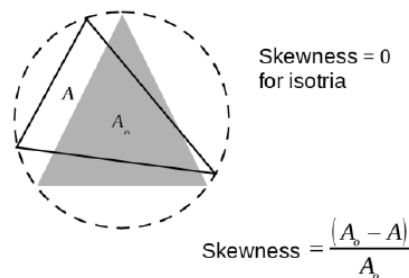
**Figura 5.13.** Parámetros de control, "Zone Cut".

## 5.5. Criterios de calidad

Existen varios criterios que permiten determinar la calidad de los elementos de la malla, y cada criterio puede ser determinado de forma distinta de acuerdo para cada programa de simulación numérica.

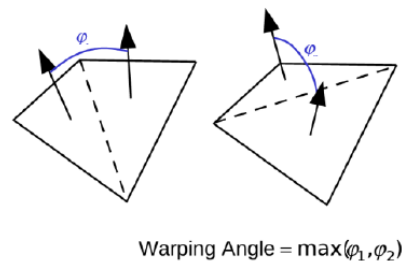
Fluent es un software comercial reconocido en la simulación CFD, y Ansa permite evaluar la calidad de los elementos para este software de la siguiente manera.

### 5.5.1. Skewness



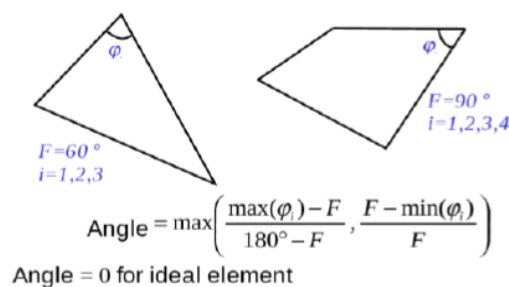
**Figura 5.14.** Cálculo del criterio “skewness” en elementos de superficie. [6]

### 5.5.2. Warping



**Figura 5.15.** Cálculo del criterio “warping” en elementos de superficie. [6]

### 5.5.3. Min angle, Max angle



**Figura 5.16.** Cálculo de los de ángulos de los elementos de superficie. [6]

El software sugiere los siguiente criterios niveles para el software Fluent.

- Fluent/Relaxed Criteria.
- Fluent/Medium Criteria.
- Fluent/Strict Criteria.

A medida que el análisis de calidad es más estricto, los valores límites disminuyen, para Fluent/Relaxed Criteria

- Skewness (fluent): 0,7
- Warping (ideas): 40
- Max angle:
  - trias(fluent): 0,7
  - quad(fluent)s: 0,7

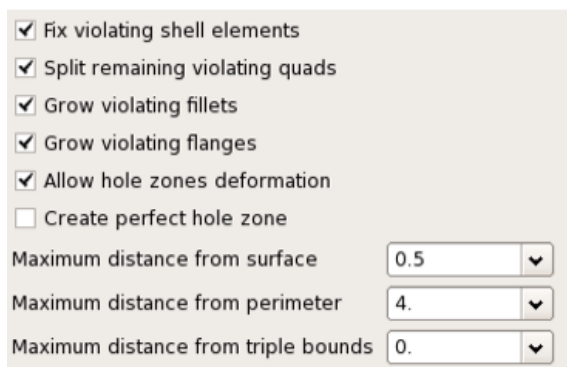
#### 5.5.4. Herramientas para mejorar la calidad de la malla

Una vez generada la malla de superficie, se puede realizar un paso adicional para mejorar la calidad la misma. El programa cuenta con distintas herramientas que ayudan a conseguirlo, “fix Quality”, “Reconstruct” y “Reshape”.

##### 5.5.4.1. Fix Quality

Con esta opción se permite mover los nodos de los elementos que incumplen los criterios una distancia determinada, a partir de la superficie o del perímetro del elemento, esta distancia se puede expresar como un valor determinado, o una expresión en función del tamaño local de elemento.

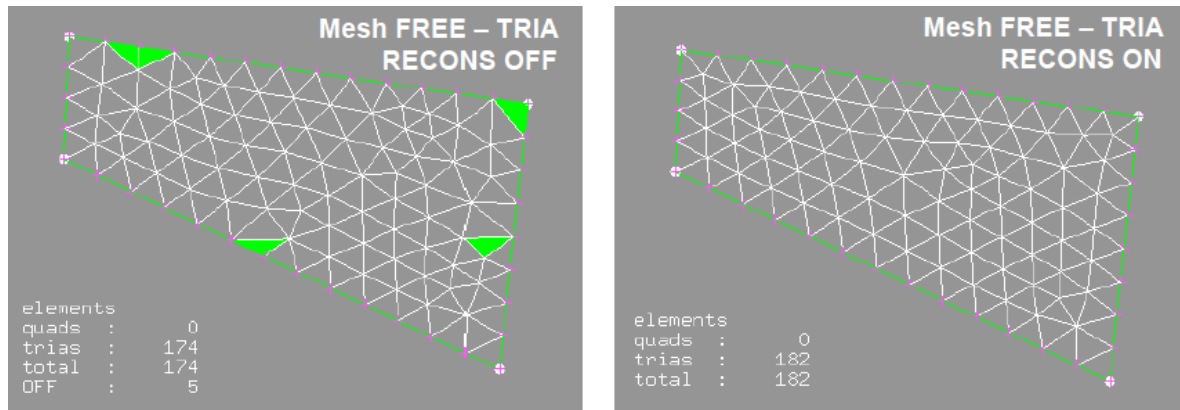
La corrección de los elementos que incumplen los criterios de calidad se realiza de acuerdo a los siguientes parámetros.



**Figura 5.17.** Tratamiento de elementos que incumplen criterios de calidad. [6]

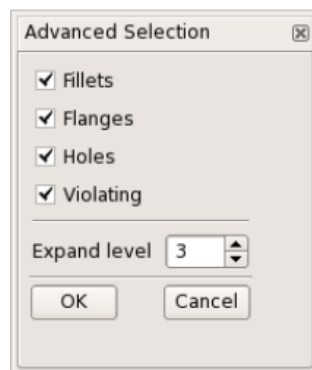
### 5.5.4.2. Reconstruct

Es una herramienta que actúa sobre una superficie que ya cuenta con una malla, y realiza un remallado para corregir problemas de calidad de acuerdo a los criterios de calidad establecidos, tomando como referencia los parámetros de mallado establecidos previamente. Los nodos que se encuentran en los perímetros de la superficie se mantienen, las mejoras se dan en el interior de la superficie, como se ilustra en la siguiente imagen.



**Figura 5.18.** Aplicación “Reconstruct” en malla de superficie. [6]

Las opciones que permite esta herramienta se muestran en la siguiente imagen.



**Figura 5.19.** Selección avanzada, “Reconstruct”. [6]

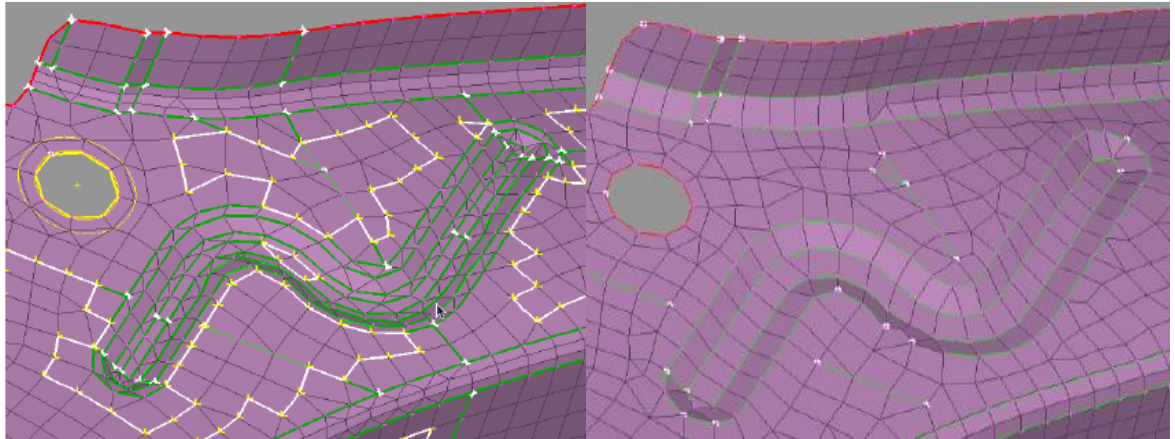
“Expand level” se refiere al número de celdas alrededor de los elementos identificados por la aplicación.

### 5.5.4.3. Reshape

Es la herramienta más avanzada para lidiar con los problemas de calidad de la malla, esta se basa principalmente en los parámetros de mallado de la pestaña “perimeters”, por lo tanto, la puede unir perímetros para simplificar localmente la malla, además realizar un remallado al



igual que “Reconstruct”, y mover nodos para superar los problemas de calidad al igual que “Fix Quality”. Presenta las mismas posibilidades de selección avanzadas que se muestran en la figura 5.19, y en la figura 5.20 es un ejemplo de los resultados de utilizar “Reshape”.



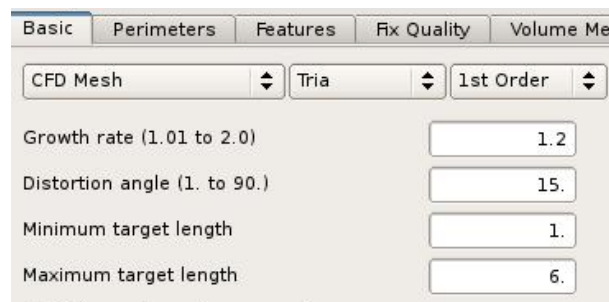
**Figura 5.20.** Aplicación “Reshape” en malla de superficie. [6]

## 5.6. Aplicaciones de mallado de superficie

A continuación, se detalla el proceso que se siguió para crear la malla de superficie, se comenta las dificultades que se presentaron y las acciones que se tomaron para corregir defectos en la malla.

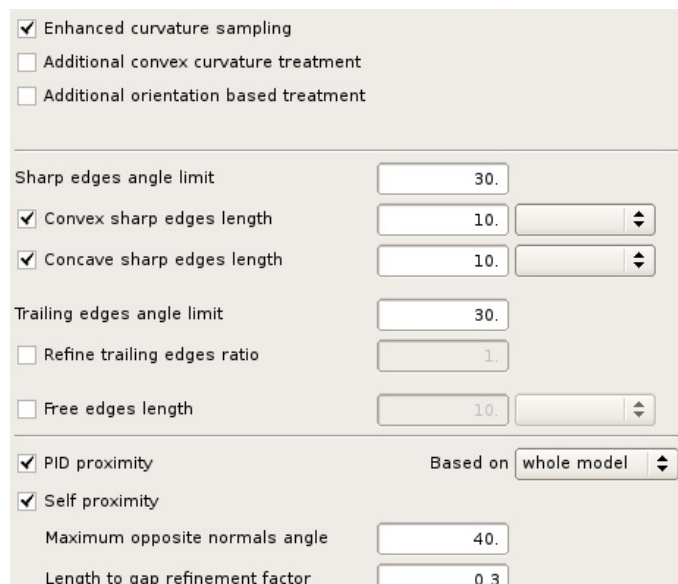
### 5.6.1. Tamaño de elemento

El primer intento de mallado se realizó con los siguientes parámetros básicos.



**Figura 5.21.** Parámetros básicos utilizados en la malla de superficie del vehículo.

Y con las opciones de refinamiento adicional activadas.



**Figura 5.22.** Refinamiento adicional.

Con esos parámetros elegidos, se obtuvo el siguiente cuadro resumen del tamaño de elementos de la malla.

ELEMENT's SIDE LENGTH	CQUAD4	CTRIA3	POLYGON	ALL
MIN	0	0.166045	0	
MEAN	0	6.44718	0	6.44718
MAX	0	511.561	0	

**Tabla 5.1.** Reporte del tamaño de elemento

Para obtener más detalles del número y tamaño de elementos, se puede solicitar al software tablas datos más elaborados y clasificados por rangos con la ayuda de "Deck info", como se muestra a continuación.

Shell Minimum Length Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
2401415					0.166045	
ID of Element with max value					MAX Value	
3192870					458.077	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	-∞	To:	1	132027	4.1212
2	From:	1	To:	2	812461	25.3608
3	From:	2	To:	3	789284	24.6374
4	From:	3	To:	4	274218	8.55967
5	From:	4	To:	5	161214	5.03227
6	From:	5	To:	6	119186	3.72037
7	From:	6	To:	+∞	915216	28.5683
Out of any class range					0	0
TOTAL					3203606	

**Tabla 5.2.** Reporte detallado del tamaño de elemento.

Classes	Ranges		Elements
Class 1:	< 1.00	4.12%	132027
Class 2:	1.00 - 2.00	25.36%	812461
Class 3:	2.00 - 3.00	24.64%	789284
Class 4:	3.00 - 4.00	8.56%	274218
Class 5:	4.00 - 5.00	5.03%	161214
Class 6:	5.00 - 6.00	3.72%	119186
Class 7:	> 6.00	28.57%	915216
			Total: 3203606

**Figura 5.23.** Gráfica del tamaño de elementos de malla del vehículo.

Como se mencionó previamente, tener elementos demasiado pequeños incrementa el número de operaciones que se realizan y el tamaño de elemento mínimo que se espera es de 1 mm. En las tablas se puede observar que no se consigue este tamaño y que 133027 elementos tienen un tamaño inferior, lo que dificulta la tarea de mejorar la malla.

Se observó que estos elementos se encontraban en zonas donde actúa el refinamiento adicional, por tal motivo se desactivaron las siguientes opciones:

- Enhanced curvature sampling.
- Additional convex curvature treatment.
- Additional orientation based treatment.

- Sharp edges angle limit.
- Trailing edges angle limit

Además, en la pestaña “perimeters”, se fijó la opción de unir perímetros con distancia inferior a 1, con tal de asegurar que no se creen elementos de tamaño inferior.

### 5.6.2. Control de mallado en superficies curvas

De acuerdo a la complejidad de la geometría y la descripción de la superficie, será necesario utilizar más herramientas de mallado, a continuación, se muestra el mallado del “splitter” como ejemplo, ya que este sirvió como ejercicio para comprender el funcionamiento de las distintas herramientas que presenta el programa.

Las dos imágenes que se muestran a continuación son producto del primer intento de mallado, como se puede apreciar el algoritmo CFD permite un refinamiento de la malla, pero el tamaño de elemento no se mantiene constante en toda la superficie.

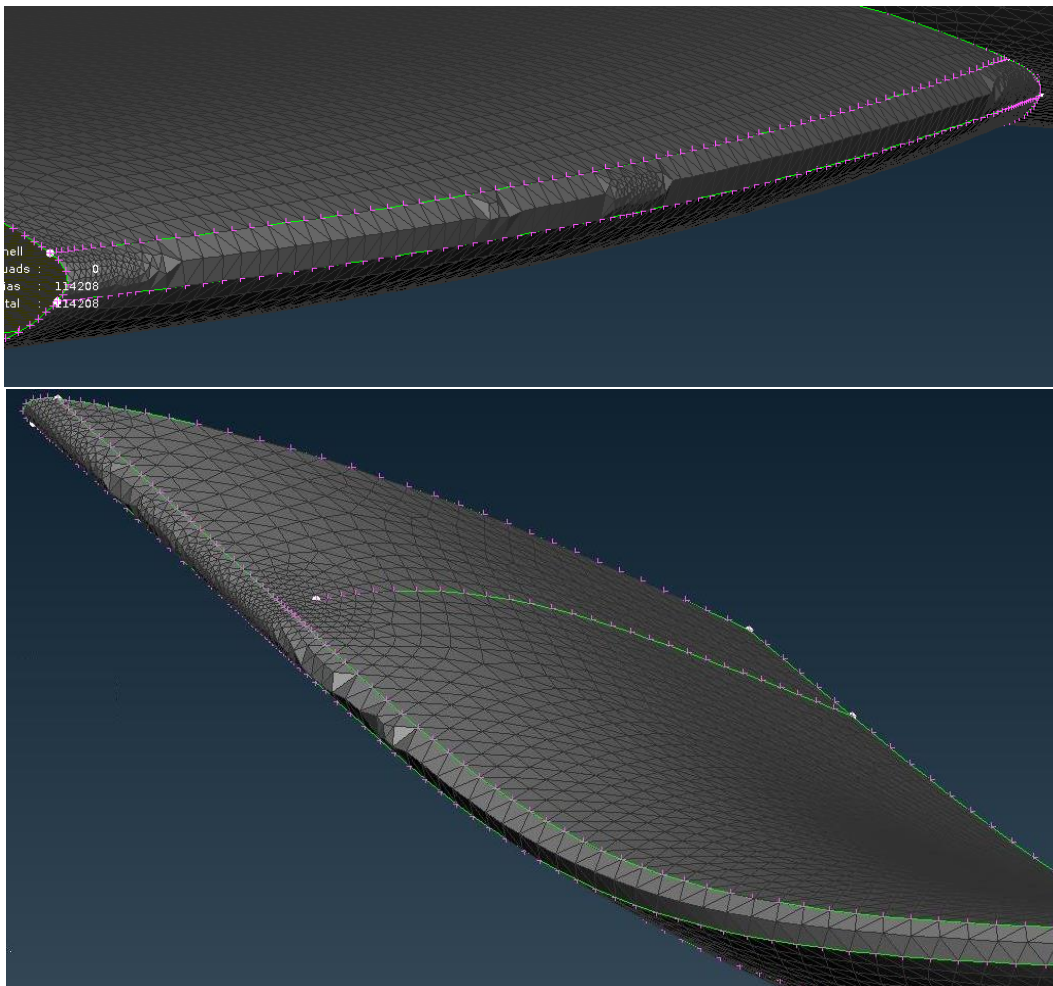
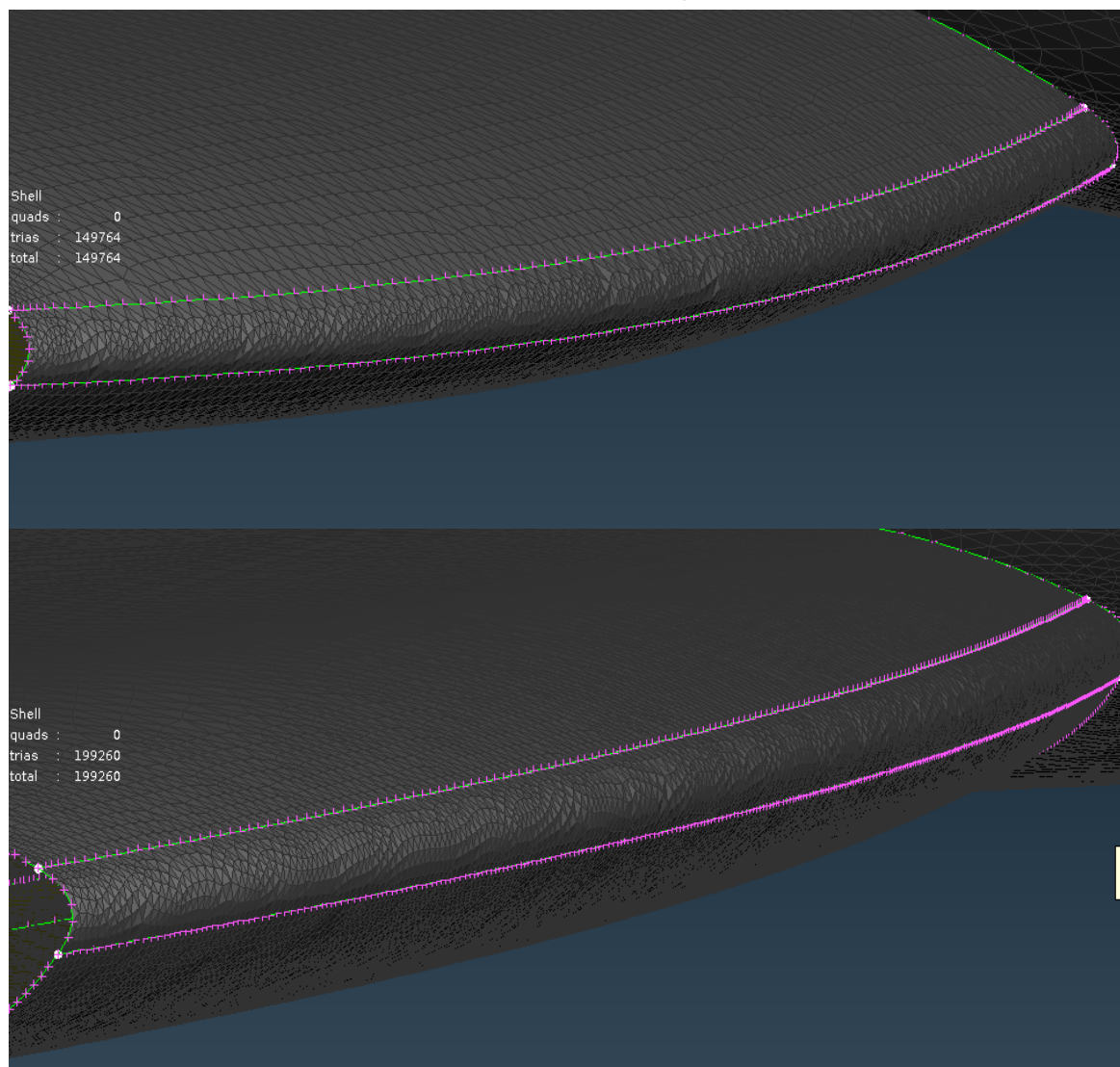


Figura 5.24. Detalle de malla de “Splitter”

Esto se puede solucionar de varias formas, la más simple es disminuyendo el ángulo de distorsión, la imagen que se muestra a continuación, muestra la superficie mallada con dos ángulos distintos, la superior fue mallada con un ángulo de distorsión de  $5^\circ$  y la inferior con  $2^\circ$ . Se puede apreciar que en la curvatura presenta una mejor malla, aunque por otro lado se en el resto de la superficie aumenta la densidad de la malla, el número de elementos aumenta de 114208 a 199260 elementos en la última malla del splitter.



**Figura 5.25.** Efecto de disminuir la distorsión en la malla de superficie.

Así que, si además si considera que el número de elementos no aumente considerablemente, la opción de disminuir la distorsión no es viable.

Una solución que fue sugerida por parte del personal de soporte al usuario, fue la de dividir la curvatura por la mitad para mejorar la calidad local de la malla, para lo que es necesario utilizar en el programa “divide face”. Para probar los resultados de esta sugerencia, se intentó con

los mismos parámetros de mallado del ejemplo anterior.

Otra herramienta utilizada para mallar esta zona es “fillet treatment”, y los parámetros adicionales que se utilizó fueron los siguientes.

Min. Radius	Max. Radius	Min. Width	Max. Width	Treatment	Length	
3.5	4.2	8.4	11.98	auto	L	↓
4.3	4.45	9.98	10.35	auto	L	↓
Default	-	-	-	off		↓

**Figura 5.26.** Especificaciones, “Fillet Treatment”.

Y como mencionamos previamente, se puede hacer uso de “Cut zone” para generar elementos anisótropos en perfiles de alerones, por lo que se hizo un intento con esta herramienta y los parámetros de mallado fueron los siguientes.

Zone Cut Parameters	
Definition	Gradual
Absolute first height	1.
Growth factor	1.2
Number	3
Max aspect	1.
Separate angle	160.
Connect angle	60.
Element type	tria
<input checked="" type="checkbox"/> Regenerate macro shells	
Expand level	1
Smooth zones	Full
Proximity distance	1. * local length
<input type="checkbox"/> Cut faces on zones	
<input type="checkbox"/> Add zones to set	
OK Cancel	

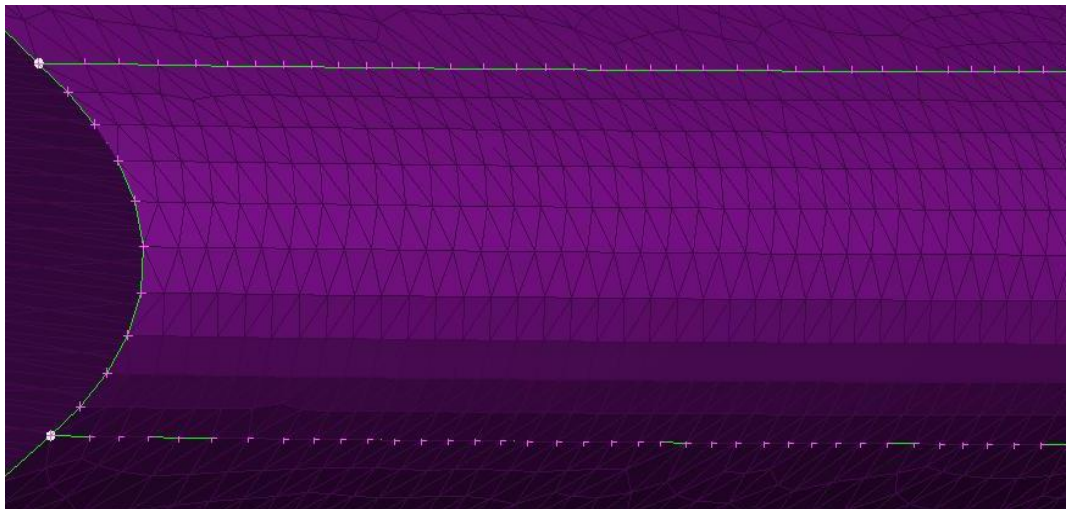
**Figura 5.27.** Parámetros en mallado del “Splitter”, Zone Cut”

Con cualquiera de las herramientas mencionadas, los inconvenientes relacionados al tamaño de elemento en la curvatura fueron corregidos, a continuación, se muestra imágenes de la misma zona con las tres alternativas de mallado.

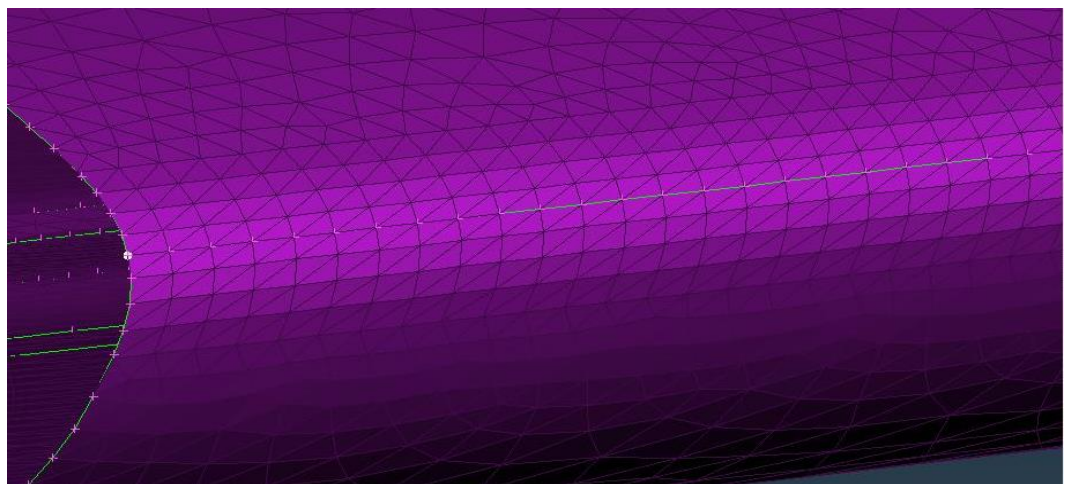




**Figura 5.28.** Aplicación de “Divide Face” en la malla de superficie, “Splitter”.



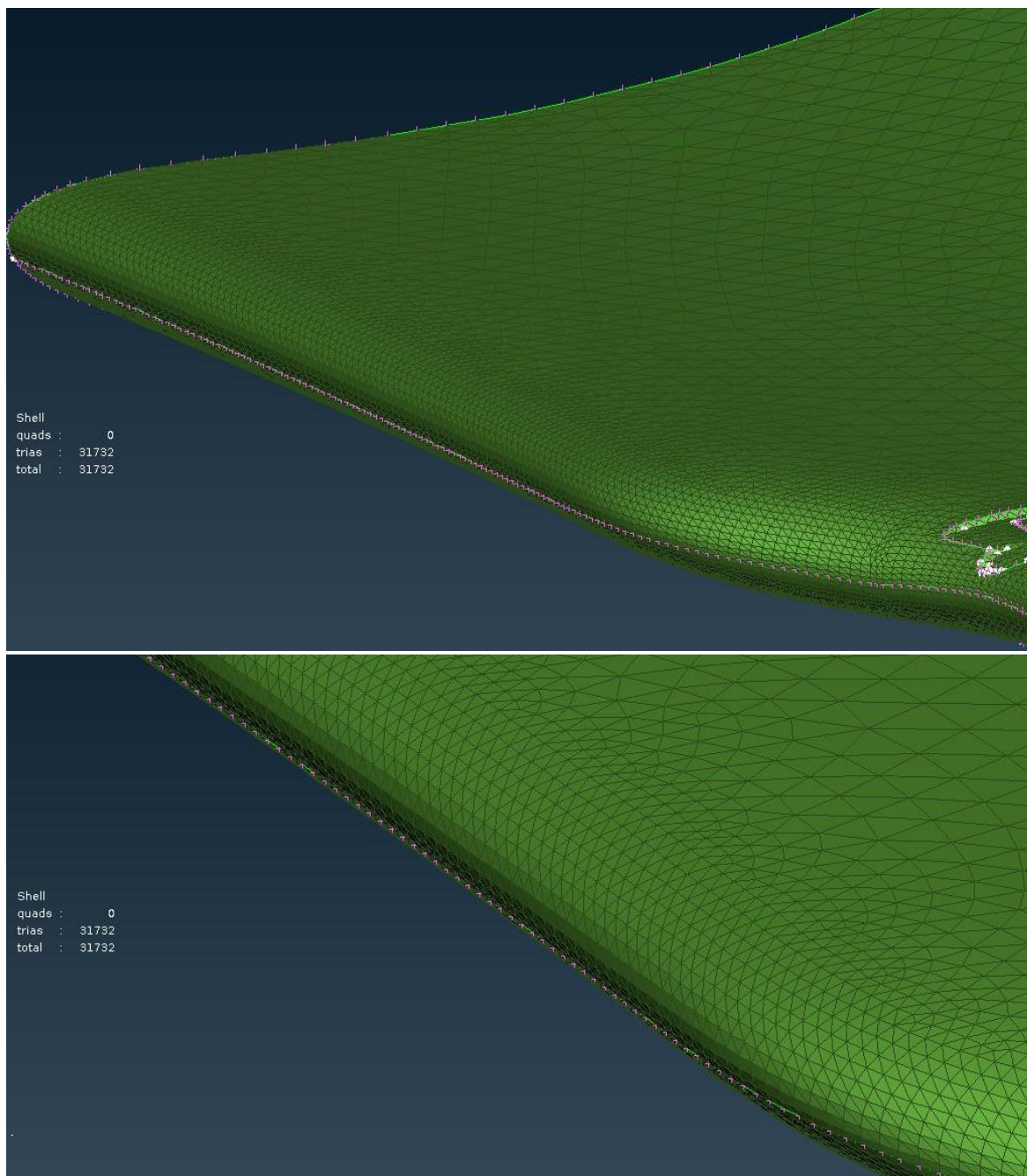
**Figura 5.29.** Aplicación de “Fillet Treatment” en la malla de superficie, “Splitter”.



**Figura 5.30.** Aplicación de “Zone Cut” en la malla de superficie, “Splitter”.

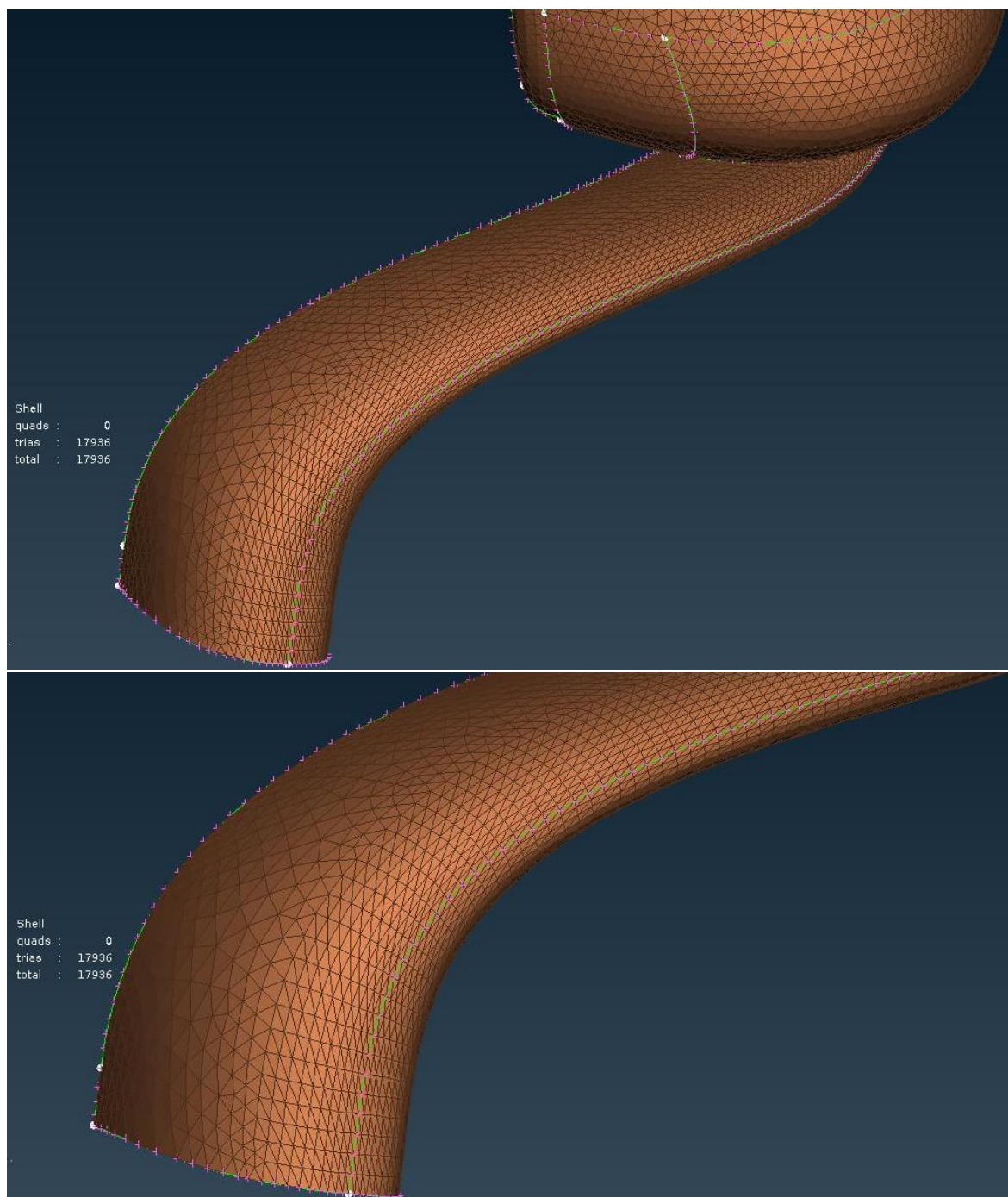
Por lo tanto, ya que se puede controlar la malla en estas superficies, se decide utilizar “Zone Cut” en el alerón y en el retrovisor, específicamente en el soporte del retrovisor por su forma particular y para el resto de superficies se utilizó “Fillet treatment”.

El resultado de la malla en las zonas del retrovisor y alerón son los siguientes



**Figura 5.31.** Resultado de aplicación de “Zone Cut” en alerón.

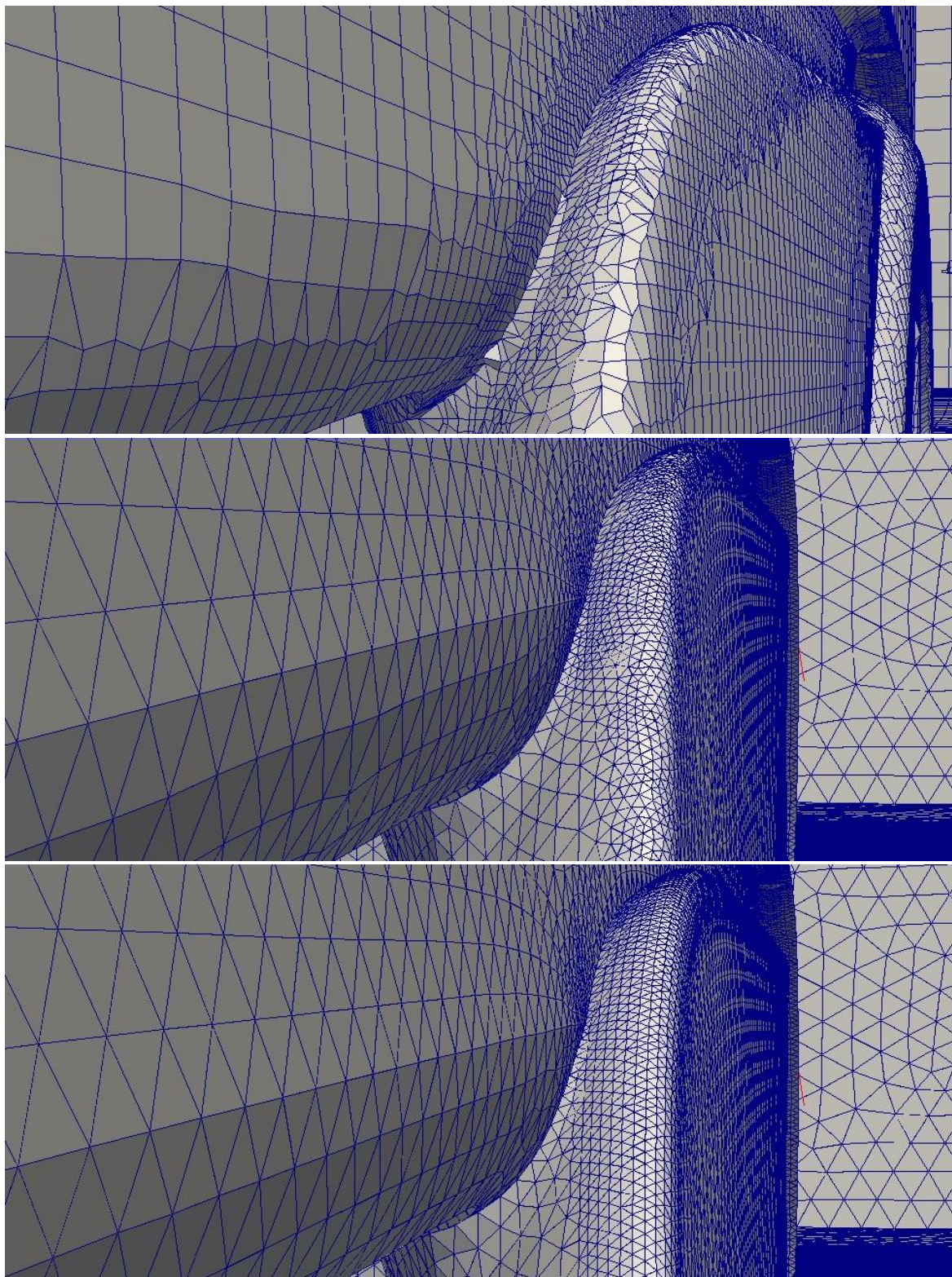




**Figura 5.32.** Resultado de aplicación de “Zone Cut” en retrovisor.

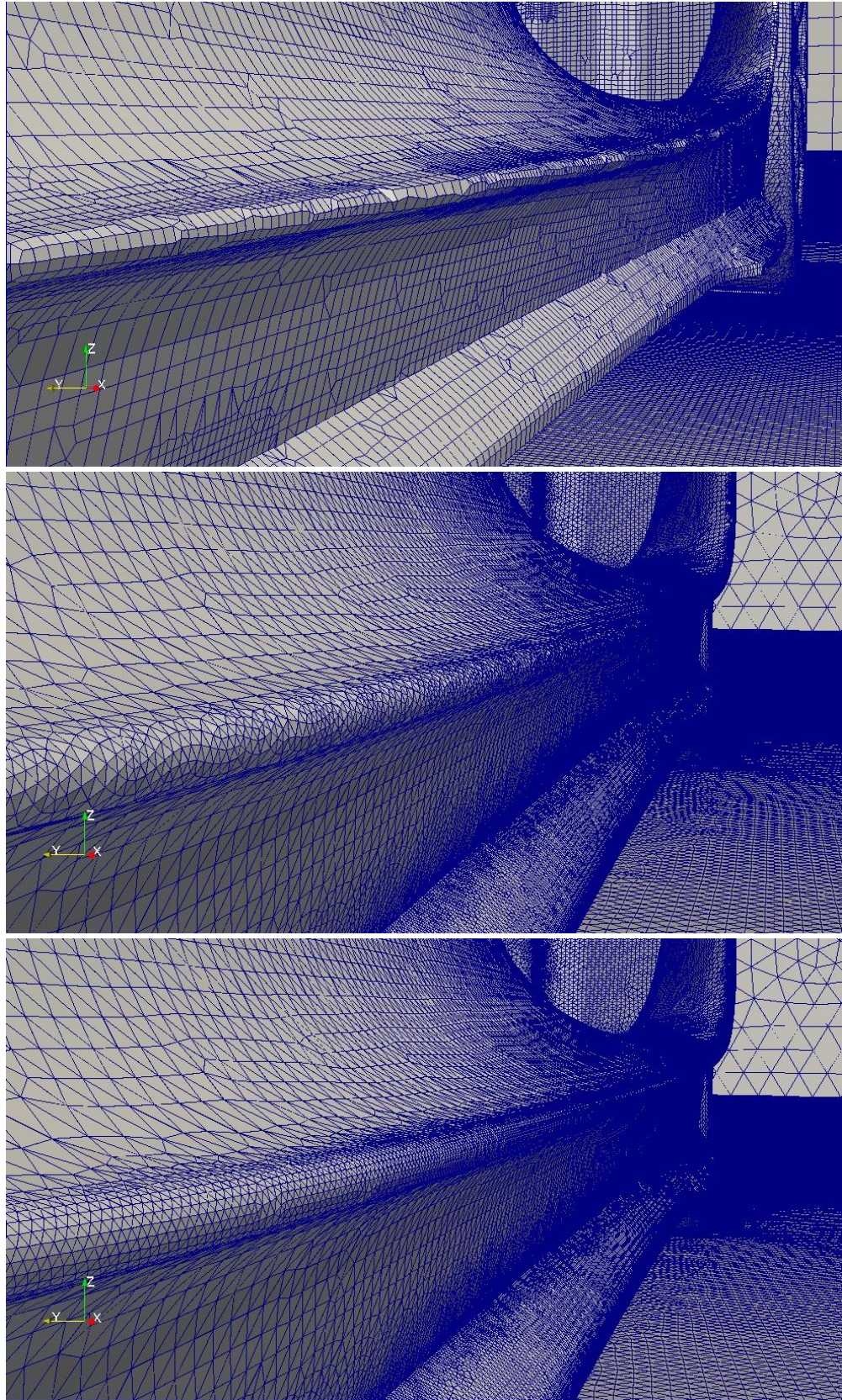
Para ver la mejora que supone utilizar las herramientas mencionadas en la malla de superficie, se muestra a continuación una comparativa en la que se incluye la malla realizada con Open Foam por el fabricante. Esto se pudo realizar con el software Paraview, ya que el formato de la malla del fabricante no se puede ejecutar en Ansa.





**Figura 5.33.** Comparación de la malla utilizando “Fillet Treatment”



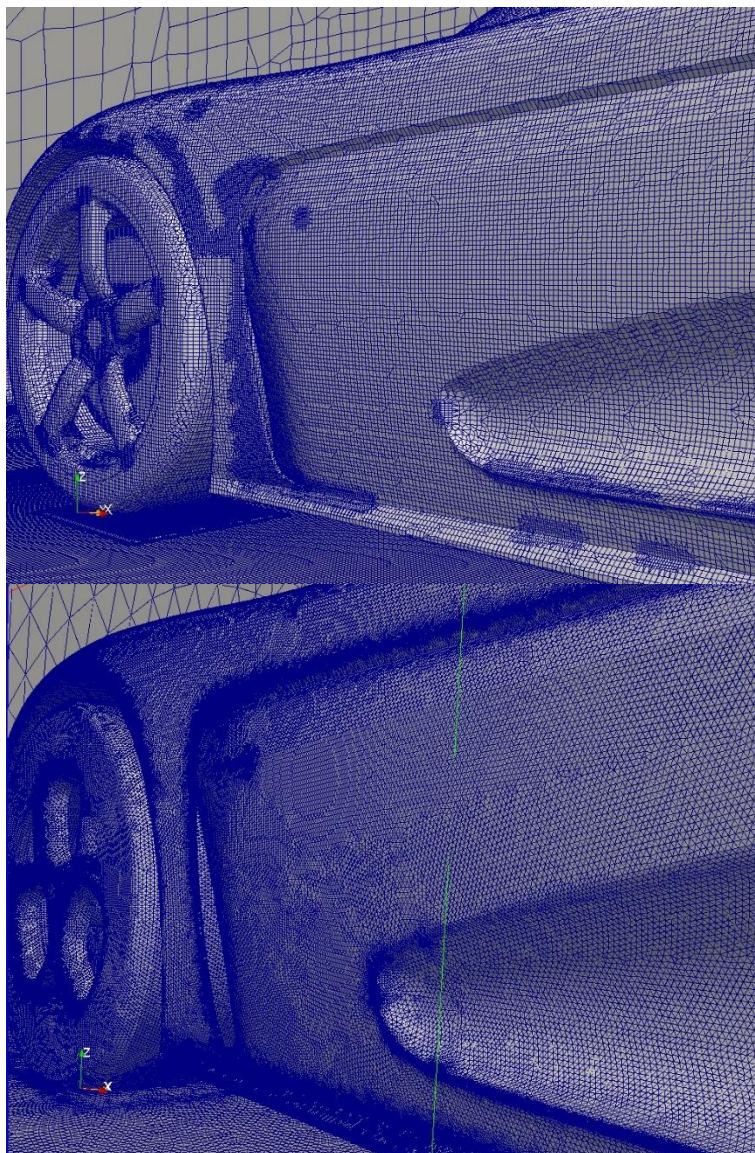


**Figura 5.34.** Comparación de la malla utilizando “Fillet Treatment”.



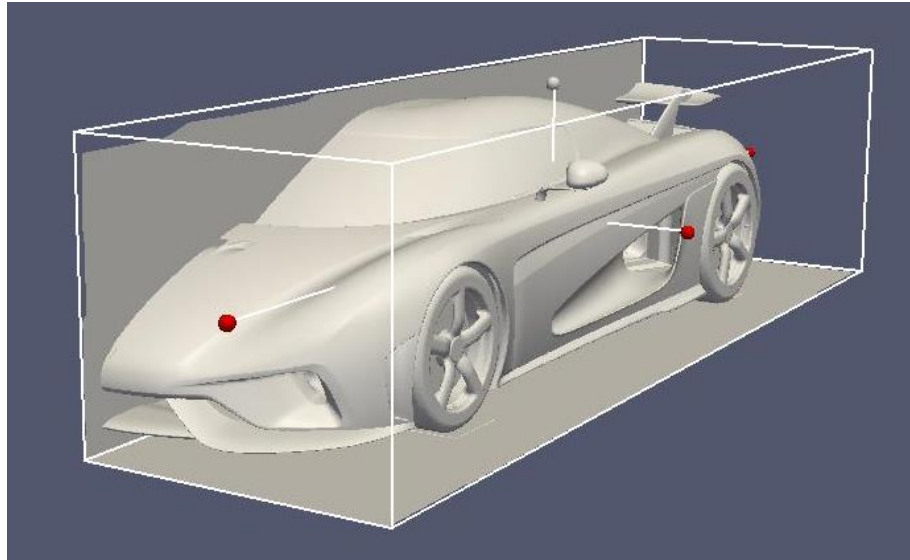
La comparación entre las mallas obtenidas por Open Foam y Ansa, debe ser tratada con cuidado, básicamente debido a que el tipo de elementos utilizados y el algoritmo de generación son distintos en los programas mencionados. El hecho de utilizar elementos triangulares implica mayor flexibilidad en la representación de la malla de superficies por lo tanto el resultado es una mejor representación de la superficie.

Además, si se observa la figura 5.35, el refinamiento de la malla de Ansa sigue siendo excesivo en ciertas zonas.



**Figura 5.35.** Comparativa entre malla de Open Foam y Ansa.

En Paraview se puede obtener el número de elementos de la malla de superficie de todo modelo, con ayuda de la herramienta “Clip”, en la que se selecciona la zona que se desea obtener información con la opción “Box”.



**Figura 5.36.** Herramienta “Clip” de Paraview.

Y con esto se obtiene un estimado del número de celdas vehículo, porque se están incluyendo celdas que forman la pared de simetría y del suelo.

Statistics	
Type:	Unstructured Grid
Number of Cells:	1748293
Number of Points:	1649280
Memory:	1.9e+02 MB

**Figura 5.37.** Número de elementos de malla Open Foam.

Con esta información se decidió disminuir el número de elementos de la malla, ya que la malla que se generó sobrepasaba por bastante este número, y para lograrlo se debía aumentar el tamaño en las superficies planas que no cuenta con refinamiento y en las superficies curvas fueron malladas con “fillet treatment”

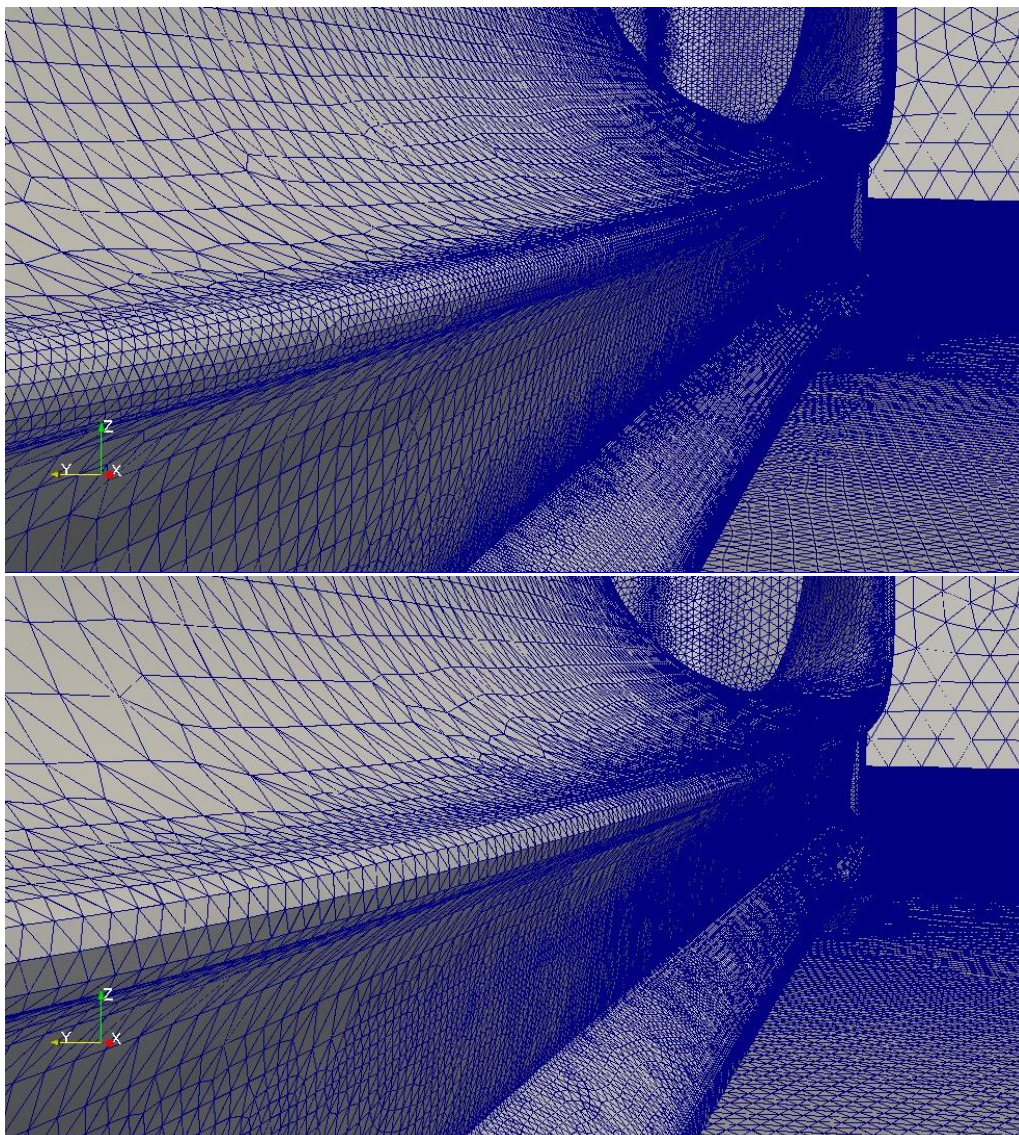
El rango del tamaño de los elementos en el vehículo se aumentó a los siguientes valores:

- Minimum target length: 3
- Maximum target length: 10

Y la distorsión en distorsión en fillet treatment 5%L

Un ejemplo de los cambios realizados se muestra a continuación.





**Figura 5.38.** Efecto del tamaño de elemento en la malla de superficie.

## 6. Mallado de volumen

### 6.1. Introducción al mallado de volumen

Para crear mallas no estructuradas, se requiere definir una entidad de volumen previamente en la cual se generarán elementos tridimensionales. En CFD, el proceso de mallado del volumen se realiza en dos partes; en la primera, se generan prismas o hexaedros a partir de la malla de superficie, por capas que van aumentando su altura hasta conseguir elementos isotropos, el software la denomina “Layer Mesh”, y en la segunda se generan tetraedros sobre los prismas completando la malla de volumen, o “Volume Mesh”.

### 6.2. Layer mesh

Los parámetros de control de generación de este tipo de malla se encuentran agrupados de la siguiente forma

#### 6.2.1. Parámetros Básicos

Se refiere a parámetros como número de capas de prismas sobre la malla de superficie, sus dimensiones y el tratamiento que se debe realizar en áreas conflictivas, estos se muestran a continuación.

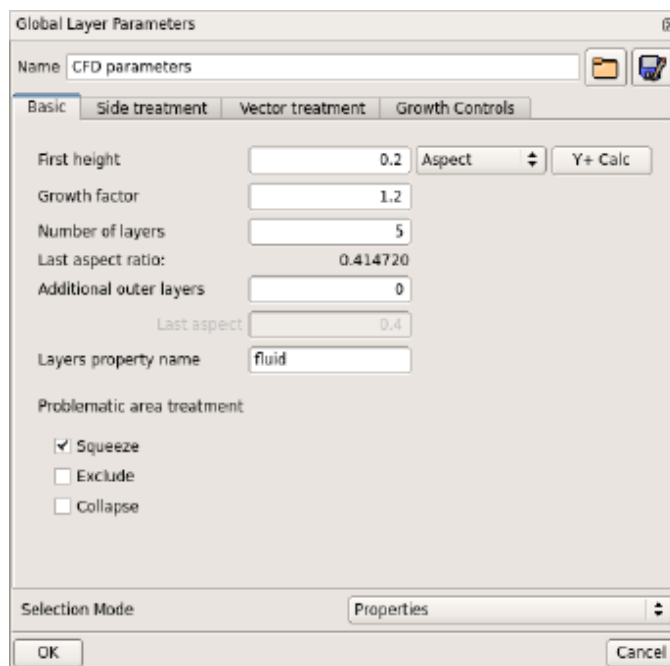


Figura 6.1. Parámetros básicos, “Layer mesh”. [6]

### 6.2.1.1. Control del tamaño

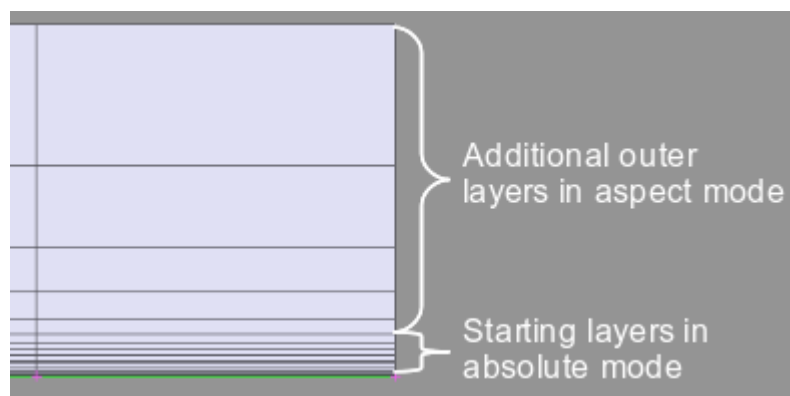
La altura del primer elemento se especifica de las siguientes formas

- Absolute: De este modo se especifica directamente la altura en la que se sitúa el primer nodo.
- Aspect: Se especifica como una relación de aspecto, es decir, un porcentaje del tamaño del elemento de superficie.

“**Growth rate**” es el factor con el cambiará la altura de la siguiente capa de prismas.

“**Additional outer layers**” se refiere a las capas de prismas adicionales que se colocaran en modo de relación de aspecto, la siguiente imagen muestra un ejemplo de ello.

Con esto se logra aumentar la densidad de la malla en la región que está cerca de la superficie, y que los elementos aumenten su altura hasta conseguir una relación de aspecto de 1, con lo que se consigue elementos isótropos.



**Figura 6.2.** Número de capas de malla prismática. [6]

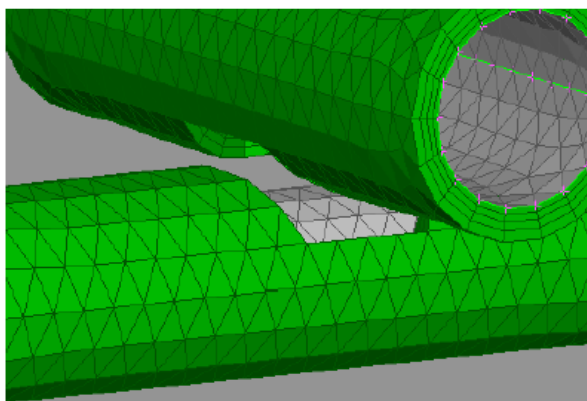
### 6.2.1.2. Zonas Conflictivas

Son aquellas en las que no existe suficiente espacio para que se genere el número de capas de acuerdo a los parámetros especificados, o zonas donde no se puede calcular al vector normal a la celda adecuado, por lo tanto, se presenta un conflicto en la creación de los prismas.

Para resolver la malla en estas zonas se puede optar por una de las siguientes alternativas.

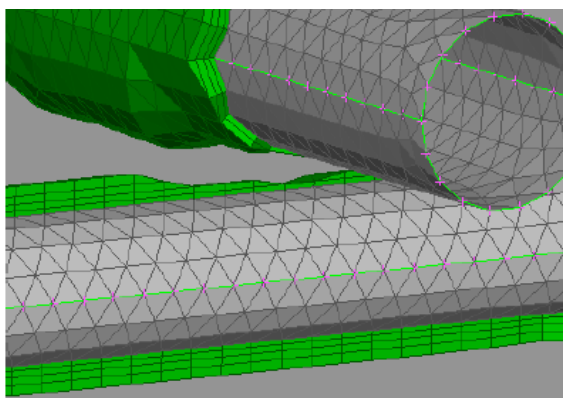


- Exclude: Excluir las zonas conflictivas de la generación de prismas.



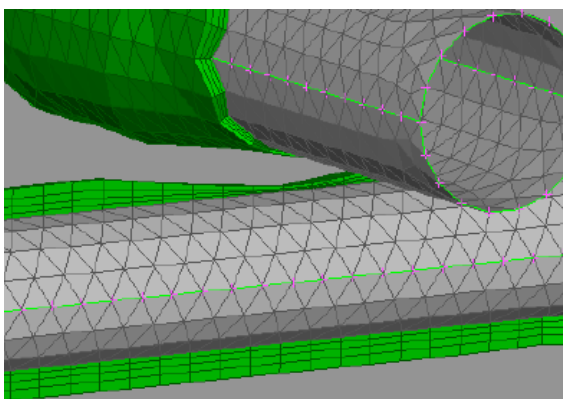
**Figura 6.3.** Tratamiento de áreas conflictivas, "Exclude". [6]

- Collapse: Colapsar la generación de prismas localmente y completar la malla prismática con pirámides y tetraedros.



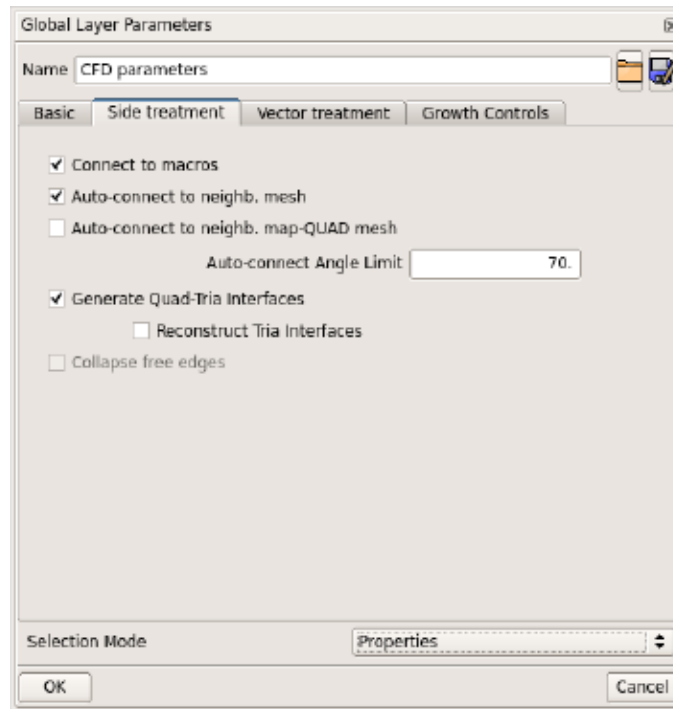
**Figura 6.4.** Tratamiento de áreas conflictivas, "Collapse". [6]

- Squeeze: Reducir la altura de los prismas.



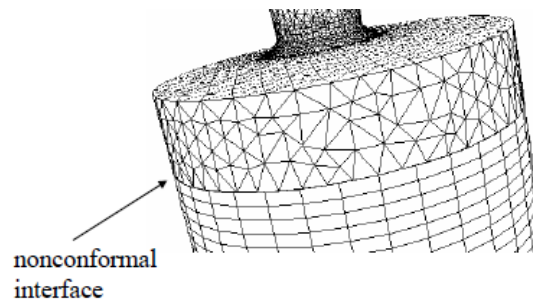
**Figura 6.5.** Tratamiento de áreas conflictivas, "Squeeze".

### 6.2.2. Side treatment



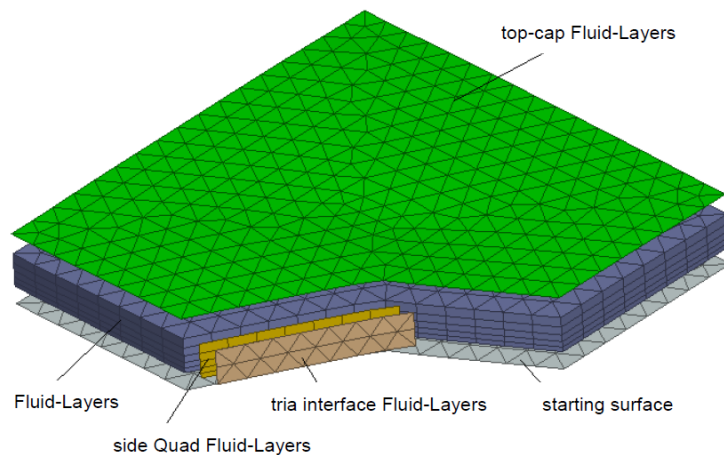
**Figura 6.6.** Parámetro de control del tratamiento lateral, “Layer mesh”. [6]

“Generate quad-tria interfaces” es una opción que ayuda a generar una malla inconforme.



**Figura 6.7.** Ejemplo de malla inconforme. [2]

Esto se logra mediante una malla de triángulos que se conectan con las caras rectangulares laterales de los prismas que quedan expuestas en zonas conflictivas donde no se ha completado la malla de prismas, de lo contrario, no se podría conectar la malla de tetraedros con estas caras de los prismas en la siguiente fase de mallado. A continuación, se puede ver una representación más detallada de la malla de prismas que se genera a partir de la malla de superficie y los elementos triangulares que se conectan con las caras rectangulares de los prismas.

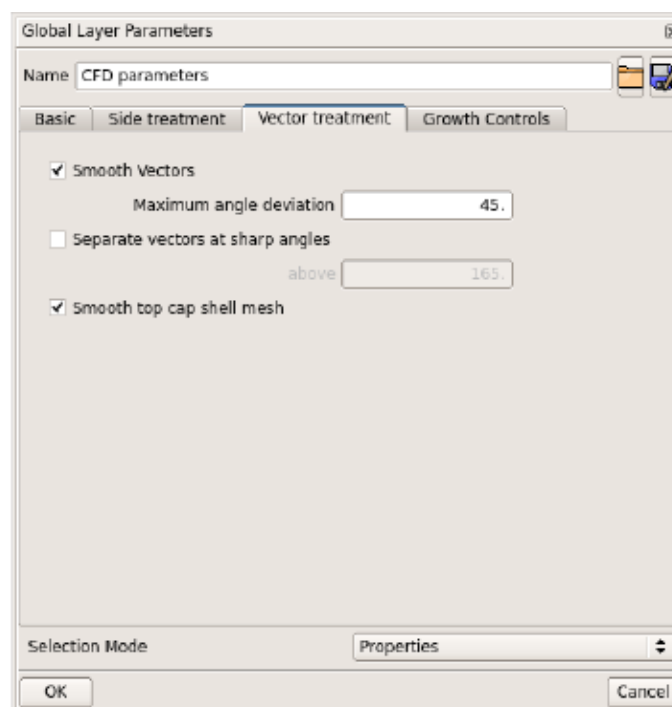


**Figura 6.8.** Detalle del tratamiento del software para mallas inconforme. [6]

Antes de utilizar esta opción, es importante saber si el código de simulación CFD puede resolver mallas inconformes.

### 6.2.3. Vector treatment

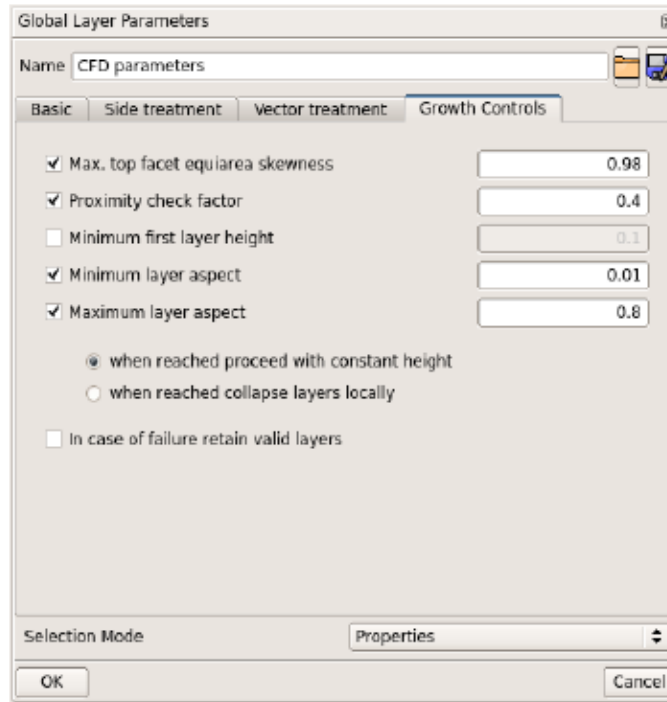
En esta pestaña se controla los parámetros relacionados al vector normal asociado a las celdas, aquí se especifica la desviación máxima que se permite al vector, el tratamiento que se dará en ángulos acusados y un tratamiento adicional que permite suavizar las celdas colocadas en la última capa de prismas.



**Figura 6.9.** Parámetros de control del vector asociado a la celda de superficie, "Layer mesh". [6]

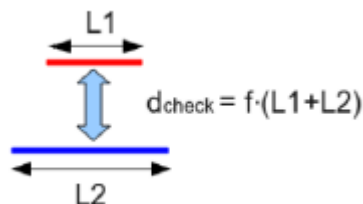
### 6.2.4. Growth control

Los controles de crecimiento de se muestran en la siguiente imagen.



**Figura 6.10.** Parámetros de control de crecimiento de los elementos, “Layer mesh”. [6]

El factor de proximidad asegura una distancia mínima entre dos capas de prismas opuestas y se calcula de la siguiente forma



**Figura 6.11.** Explicación del cálculo de factor de proximidad.

Las opciones de altura mínima de la primera capa de prismas y mínima relación de aspecto, son tomadas en cuenta cuando la opción “squeeze” fue activada en los parámetros.

## 6.3. Volume Mesh

Como ya mencionamos al inicio, los tetraedros se construyen sobre las celdas generadas sobre la última capa de prismas. De forma general se debe mencionar que el software cuenta con distintos algoritmos para crear mallas no estructuradas de volumen.

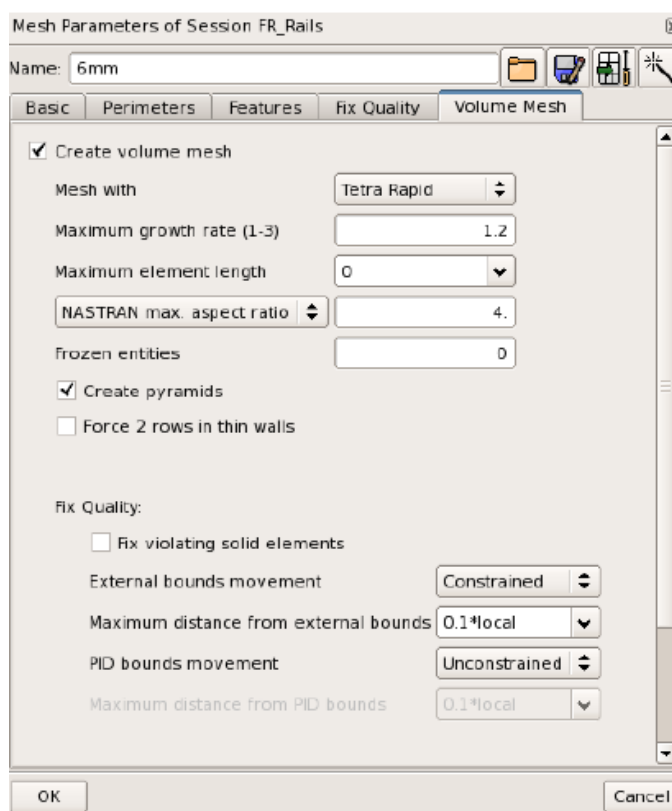
- Tetra Rapid
- Tetra FEM
- Tetra CFD
- Hexa Interior
- Hexa Poly

De todos estos, “Tetra Rapid” y “Tetra CFD”, permiten generar mallas no estructuradas para simulaciones CFD, ya que permiten controlar el crecimiento de los elementos.

### 6.3.1. Volume mesh parameters

#### 6.3.1.1. Parámetros básicos

Los parámetros de control son similares a los que ya se han mencionado.



**Figura 6.12.** Parámetros de generación de tetraedros, “Volume mesh”. [6]

#### 6.3.1.2. Fix Quality

Ya sea en la malla de prismas como en la de tetraedros, se pueden realizar correcciones en

la malla de volumen de acuerdo a los criterios de calidad que se establezcan. Esto se logra mediante el desplazamiento de nodos de los elementos que incumplen estos criterios, expresando la distancia máxima que se pueden mover estos en términos de porcentaje del tamaño del elemento.

## 6.4. Criterios de calidad de la malla

Al igual que en la malla de superficie, la evaluación se realiza mediante varios criterios.

### 6.4.1. Skewness

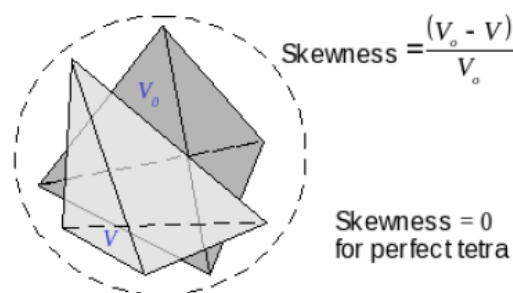


Figura 6.13. Cálculo del criterio “skewness” en tetraedros. [6]

### 6.4.2. Squish

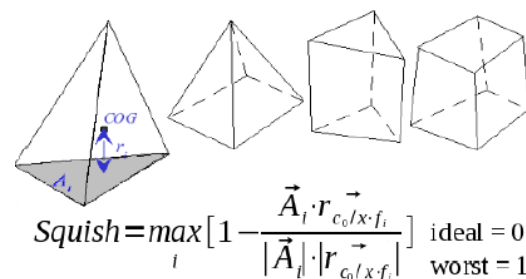


Figura 6.14. Cálculo del criterio “squish” en elementos de volumen. [6]

### 6.4.3. Min & Max angle

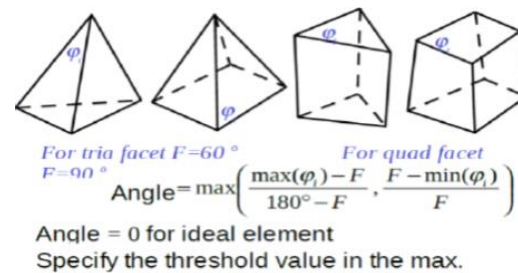
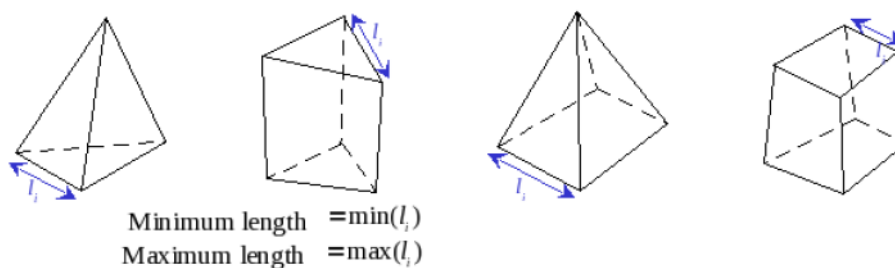


Figura 6.15. Cálculo de ángulos en elementos de volumen.

#### 6.4.4. Element length



**Figura 6.16.** Tamaño de elementos de volumen. [6]

#### 6.4.5. Negative volumen

No se dispone de una representación gráfica de este criterio, básicamente los elementos que se consideran con volumen negativo, son elementos que se han deformado tanto en su creación, que el software no puede calcular correctamente su volumen.

Los valores límite de los criterios de calidad sugeridos para los elementos de volumen son los siguientes:

- Skewness(fluent): 0,98
- Squish: 0,98
- Max angle
  - Tetras(fluent): 0,98
  - Pentas(fluent): 0,98

## 6.5. Aplicaciones de mallado en el modelo

### 6.5.1. Parámetros de mallado

Los parámetros básicos de la malla de prismas son los siguientes.

- First height: 1
- Absolute mode
- Growth factor: 1.2
- Number of layers: 4
- Additional layer: 3
- Last Aspect: 1

Con estos parámetros se busca conseguir que el tamaño mínimo de elemento sea 1, y que vayan creciendo en altura hasta conseguir elementos isotrópicos.

En lo que respecta al resto de parámetros de la malla de prismas:

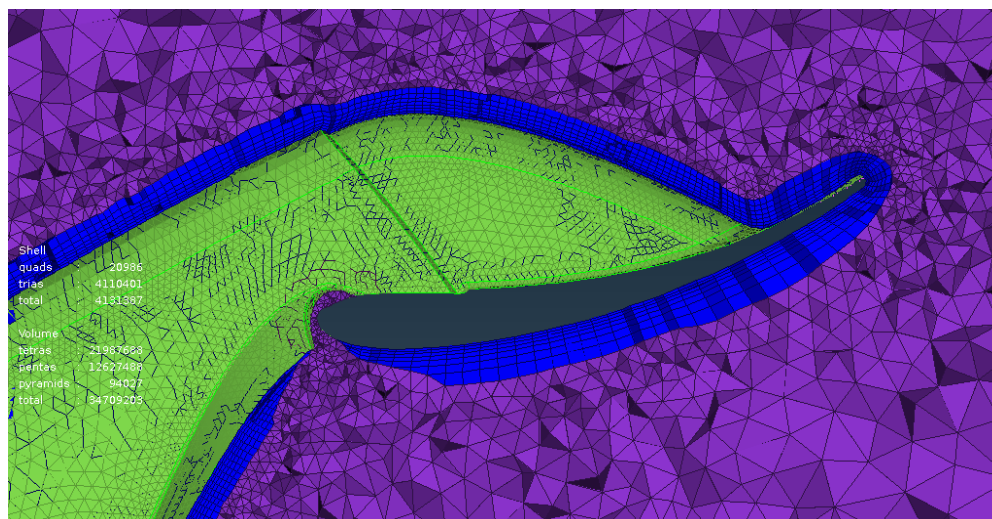
- Side treatment: No se utilizó la opción “Generate quad-tria interfaces”, ya que no se quiere obtener una malla inconforme.
- Vector treatment: La máxima desviación que se permite es de 45°, y no se permite separar los vectores en ángulos acusados.
- Growth controls:
  - Max. Top facet equiarea skewness: 0.98
  - Proximity check factor: 0.3

Los parámetros de mallado de tetraedros

- Algoritmo: Tetra rapid
- Factor de crecimiento: 1,2
- Max skewness (Fluent): 0,98

Con la ayuda del programa se realizaron cortes para apreciar particularidades de la malla, en la imagen que se muestra a continuación se puede apreciar de color azul la malla de prismas de color azul y se puede apreciar las siete capas de prismas y sobre ellas, la malla de tetraedros.



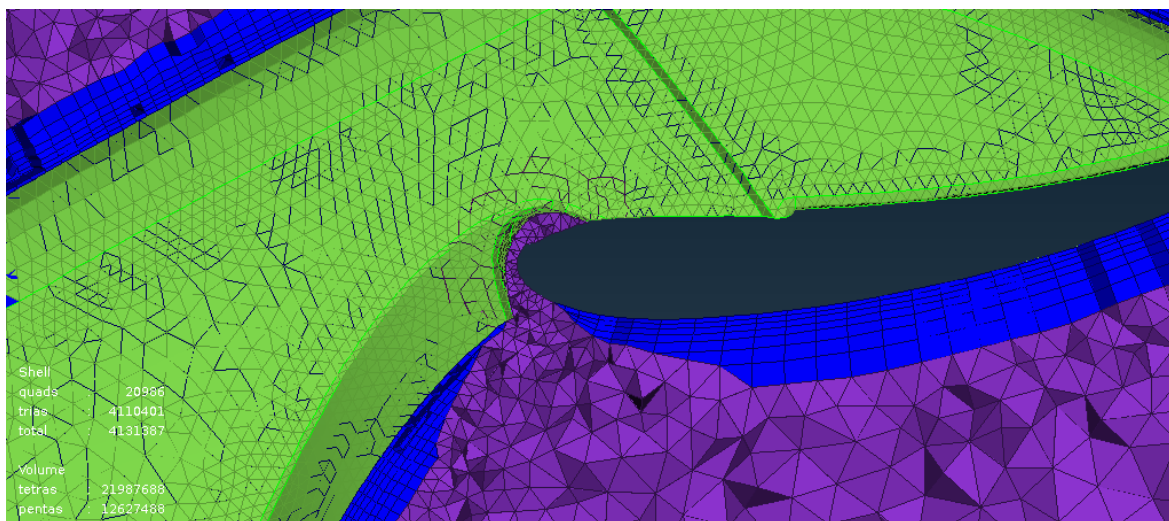


**Figura 6.17.** Representación de malla de volumen en el sector del alerón.

Además, se puede identificar la existencia de una zona problemática, en la parte inferior.

### 6.5.2. Tratamiento en áreas problemáticas

De las distintas posibilidades que brinda el programa para resolver estas zonas, se eligió “collapse”. La opción “squeeze” se descartó, ya que estrecha los prismas para que el número de capas se cumpla en las zonas problemáticas, permitiendo que el tamaño de elemento disminuya.



**Figura 6.18.** Detalle del colapso en la generación de la malla prismática.

Como se puede apreciar, debido a la forma particular de la geometría, la creación de prismas colapsa localmente donde no existe el espacio adecuado, completando la malla prismática con pirámides y prismas.

Una vez obtenida la malla del modelo se identificó que el proceso de mallado de prismas presentaba algunas dificultades debido a la complejidad de la geometría, lo cuales se describen a continuación.

### 6.5.3. Resumen de calidad

Estas son las estadísticas de los elementos de la malla de prismas que se obtienen sin aplicar la corrección de los criterios de calidad (fix quality).

SOLID Elements OUT of Thresholds		
Quality criterion	Elems Off	Threshold
EQUIVOLUME SKEW. [FLUENT]	1230	0.98
SQUISH	12	0.98
Solids < Minimum Length	961690	1
<b>NEGATIVE VOLUME [PARTIAL]</b>	<b>1</b>	-
Total Tetras Angle Off	71	0.98
Total Pentas Angle Off	15	0.98
Total Solids Angle Off	86	
Total Solid Elements	12865596	

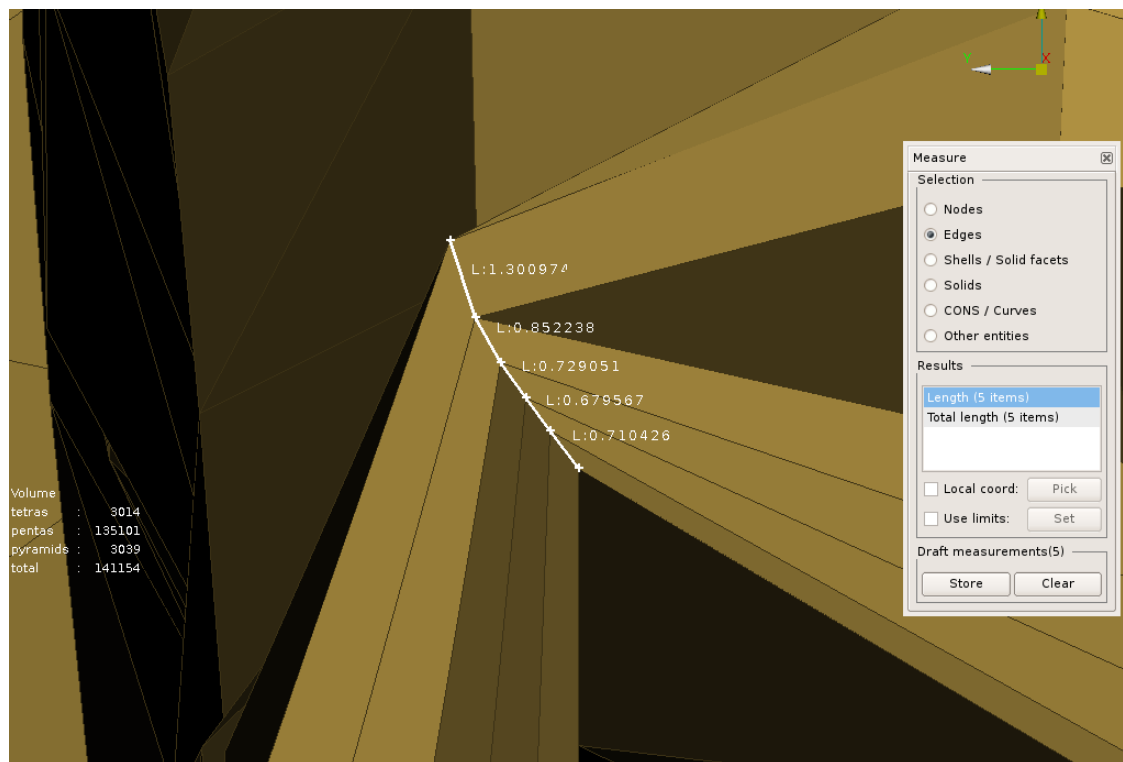
**Tabla 6.1.** Reporte resumido de criterios de calidad.

Como primera aproximación se puede ver que existen elementos que incumplen los criterios de calidad fueron elegidos, y que también existen elementos que son más pequeños del mínimo deseado.

SOLID ELEMENT's SIDE LENGTH	TETRA	PENTA	PYRAMID	ALL
MIN	0.186038	0.186038	0.186038	
MEAN	4.6919	5.74292	4.43546	5.72954
MAX	22.4736	510.284	22.4736	

**Tabla 6.2.** Reporte resumido de tamaño de elementos de calidad.

Se observó que, en muchos casos no se cumple los parámetros básicos, como son; el factor de crecimiento y la altura del primer elemento, un ejemplo de lo sucedido se muestra a continuación.



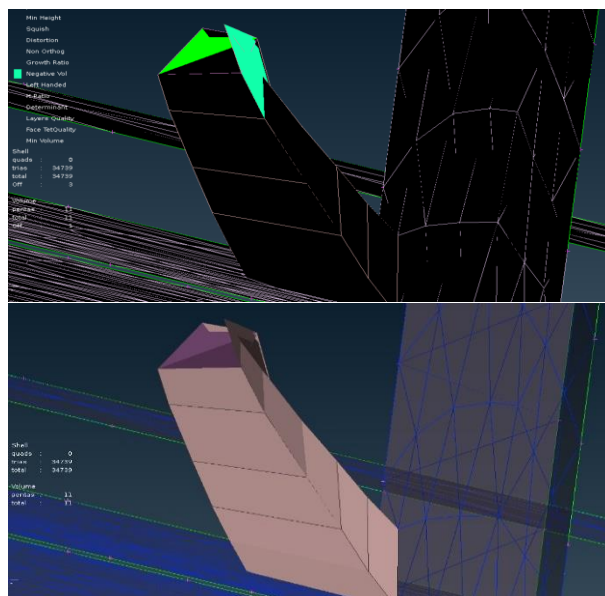
**Figura 6.19.** Altura y crecimiento de elementos en la malla de prismática.

Esto es debido a que la altura del primer elemento se respeta en áreas planas, y en zonas que contienen esquinas, la distancia varía un poco del valor definido para crear elementos con buena calidad. Una posible solución es la de aplicar “Fix Quality” incorporando el tamaño de elemento como criterio de calidad, aunque cuando se trata de mallas con número de elementos elevado, como es el caso nuestro, el proceso consume una cantidad significativa de tiempo, y es posible que exista conflicto con el resto de criterios de calidad, por lo tanto, se evitó incorporar el tamaño de elemento como criterio de calidad.

### Volumen negativo

Un volumen negativo se detecta en elementos bastante deformados y su presencia es inadmisibles en la malla, por tal motivo se localiza este elemento para analizar la forma de corregirlo.

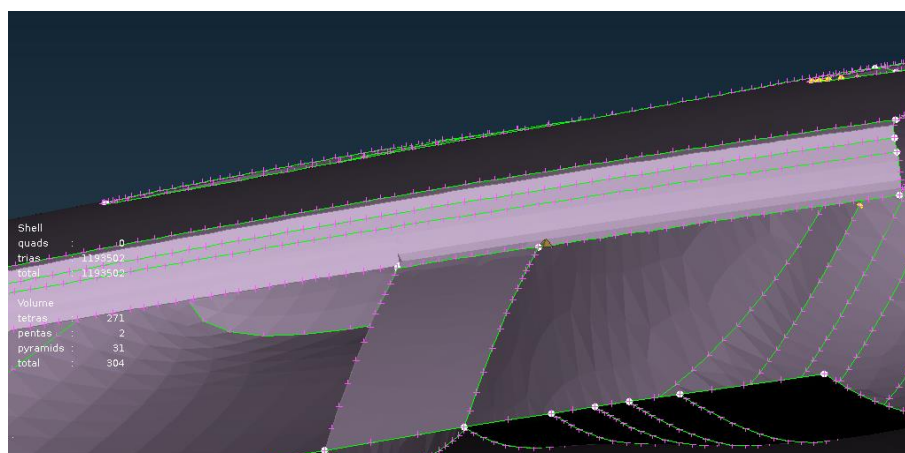
Este elemento se encuentra en el interior del vehículo, en el compartimento del motor.



**Figura 6.20.** Representación de elementos con volumen negativo.

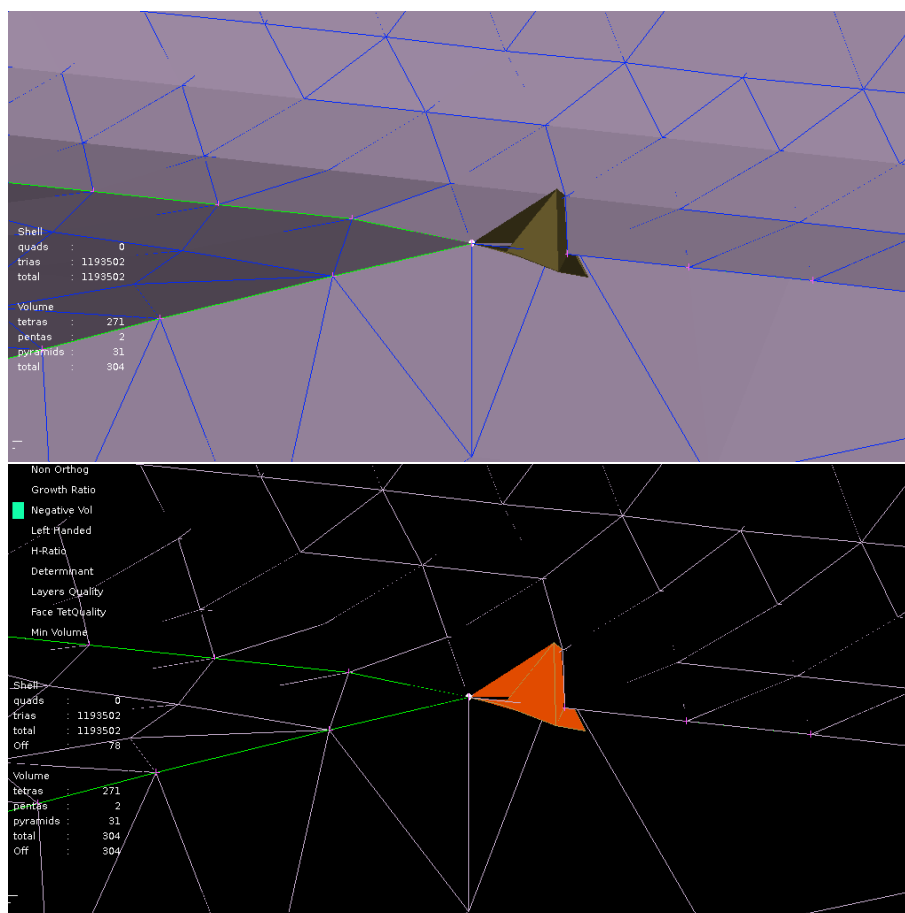
### Angulo máximo

Un ejemplo de elementos que incumplen el criterio de ángulo máximo, están en la zona detrás del capot.



**Figura 6.21.** Localización de elemento que excede el criterio de ángulo máximo.

En la siguiente imagen se realiza un acercamiento a la zona, y se aprecia que en esta zona existe un ángulo agudo, lo cual dificulta la generación de prismas.



**Figura 6.22.** Detalle de elemento que excede el criterio de ángulo máximo.

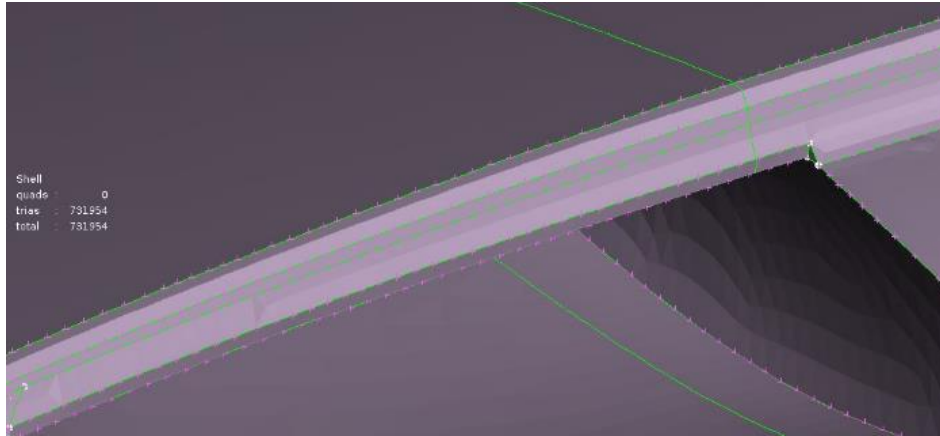
Para corregir los defectos de calidad y poder continuar con el proceso de mallado de tetraedros, se puede aplicar “Fix Quality”, esto desplaza los nodos de los elementos afectados y corrige todos los defectos que se mostraron en las tablas de calidad.

Un efecto asociado a este desplazamiento de nodos, es la reducción del tamaño de los elementos para cumplir con los criterios, por tal motivo no es suficiente aplicar “Fix Quality” para continuar con el proceso de mallado.

El factor de proximidad se aumentó a 0,5 para aumentar el espacio entre capas prismáticas opuestas y por lo tanto dejar más espacio para la creación de tetraedros.

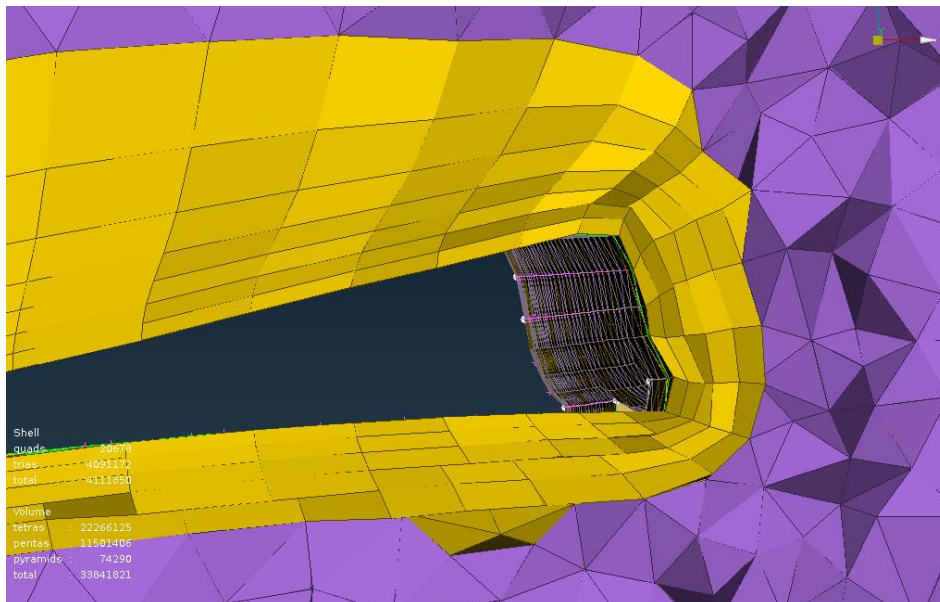
Para evitar inconvenientes en la zona detrás del capot, se realizó una pequeña modificación de geometría en esta zona particular, con pequeño corte que evita la presencia de este ángulo agudo.





**Figura 6.23.** Corrección local de geometría.

Una representación de la malla obtenida con esta modificación se muestra a continuación.



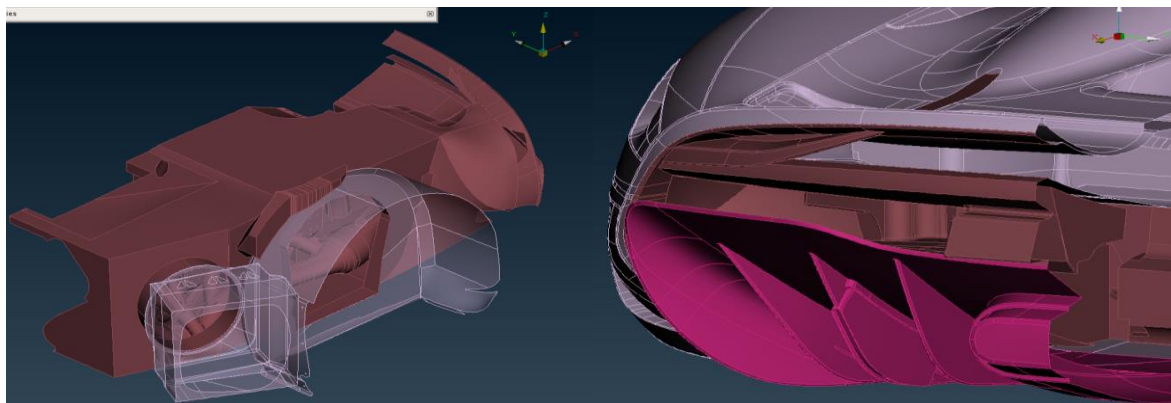
**Figura 6.24.** Representación de malla de volumen después de correcciones.

#### 6.5.4. Advanced Layer

Esta es una herramienta que permite controlar parámetros avanzado en la creación de la malla de prismas, y una de las funciones que aporta es la de limitar el número de capas de prismas en diferentes regiones del modelo. Esta medida se toma para evitar la creación de volúmenes negativos y disminuir la cantidad de elementos fuera de los criterios de calidad en el interior del compartimiento del motor. Así pues, se limita a 4 capas de prismas en el interior del vehículo y 7 en el resto del modelo, sin que se generen discontinuidades de la malla.

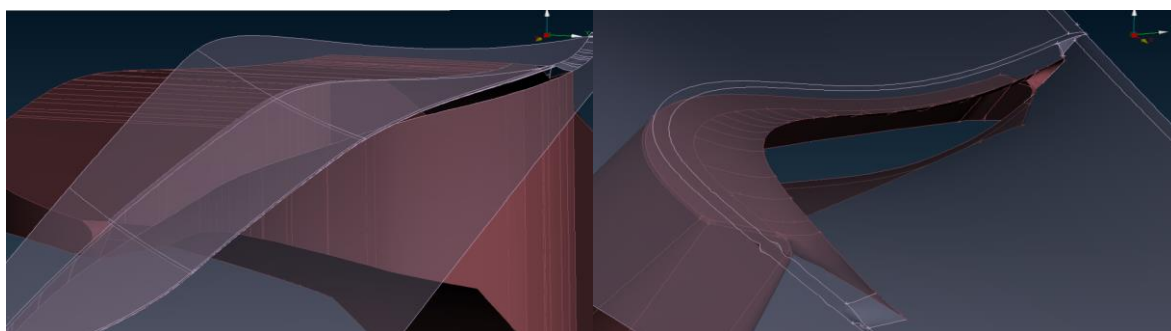
Las zonas en las que se limita las capas de prismas se muestran en las siguientes imágenes

de color lacre.



**Figura 6.25.** Zonas en las que se restringe el número de capas de prismas.

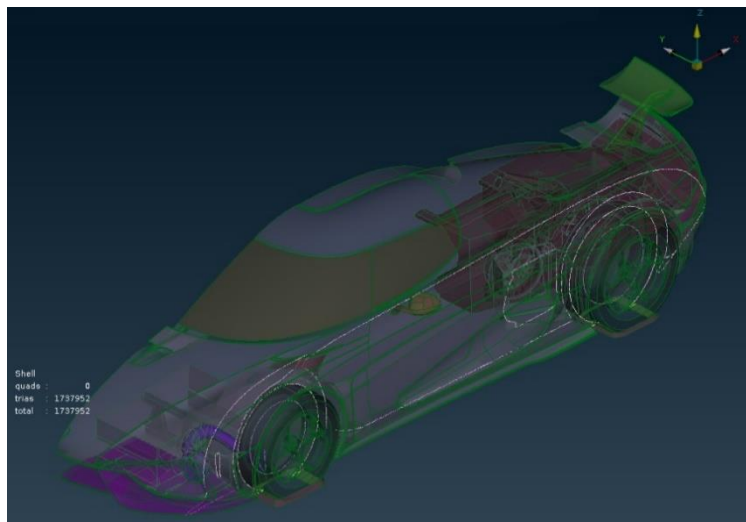
En las zonas cerca de las tomas de aire de la carrocería, en la imagen de la izquierda se muestra la toma posterior, y en la derecha la toma delantera.



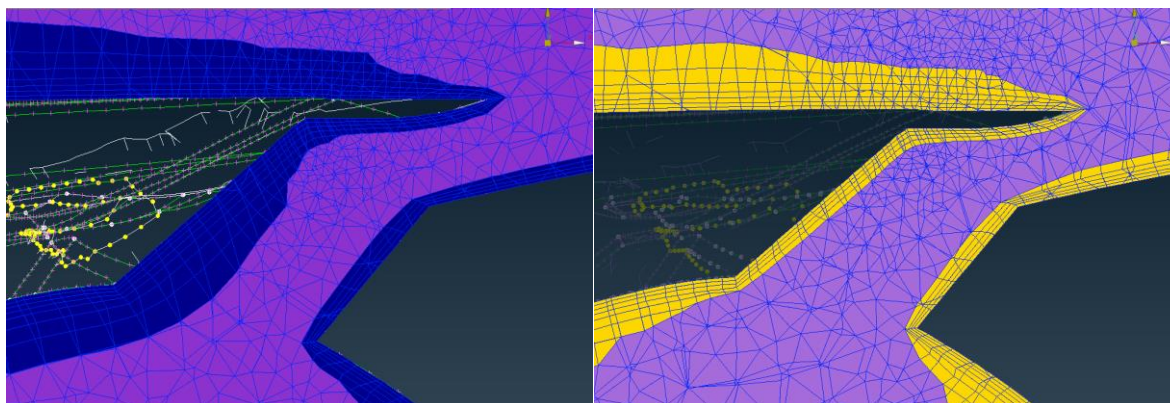
**Figura 6.26.** Zonas en las que se restringe el número de capas de prismas.

Para observar los cambios de la malla se realiza dos cortes que se representa como una línea de color blanco en las siguientes imágenes.

Corte longitudinal a la altura de la toma de aire delantera



**Figura 6.27.** Localización del corte en el vehículo.

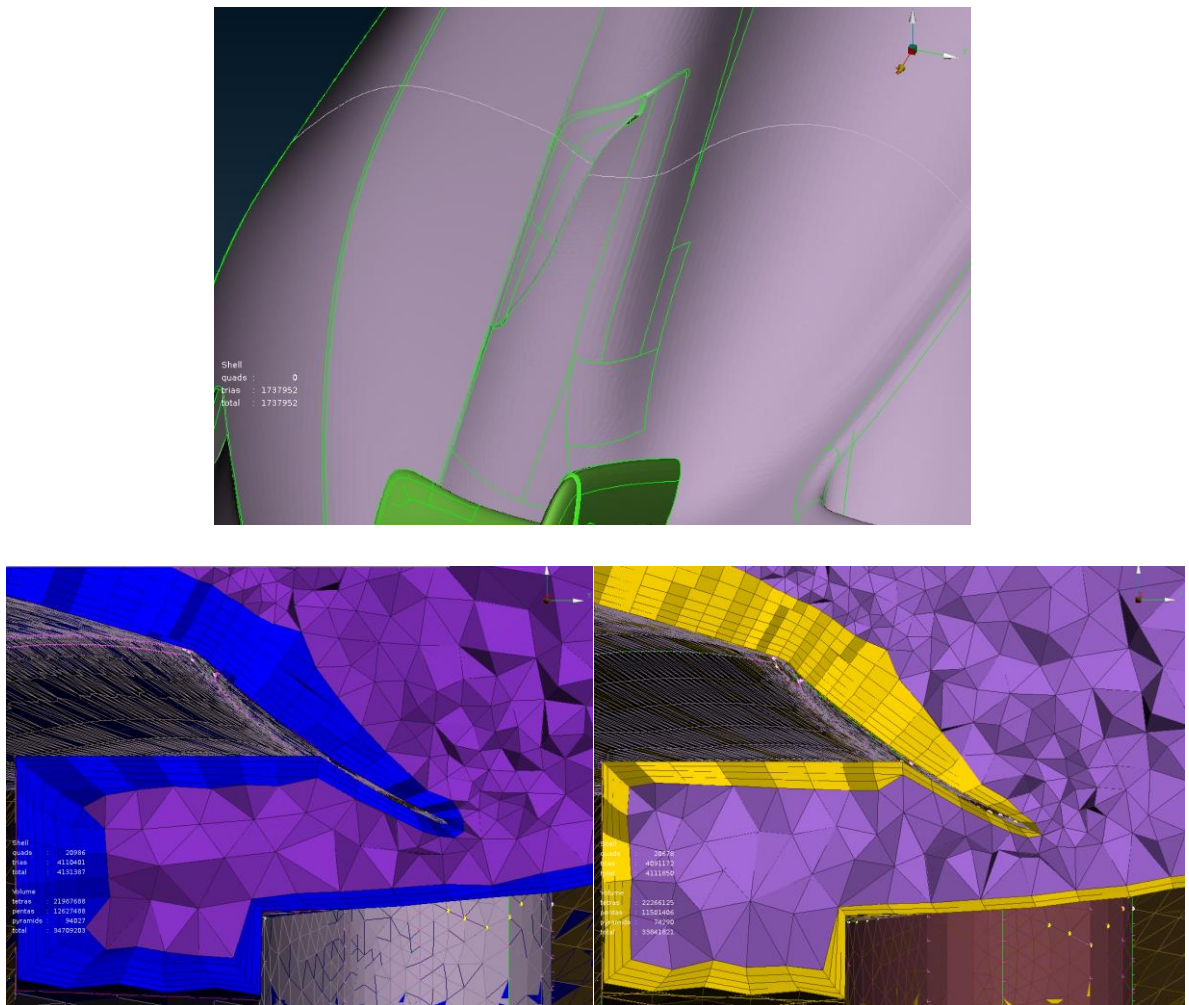


**Figura 6.28.** Representación detallada de malla de volumen, toma delantera.

En la imagen de la derecha se muestra la nueva malla con restricción del número de capas en el interior de vehículo.

Corte transversal a la altura de la toma de aire posterior





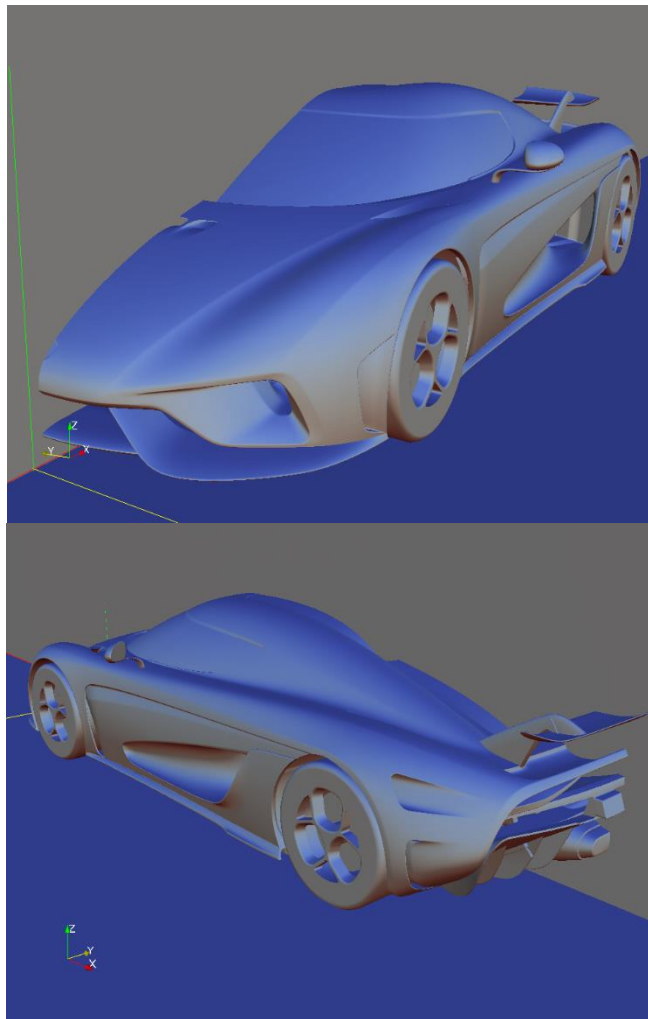
**Figura 6.29.** Representación detallada de malla de volumen, toma posterior.

Aunque se obtiene fácilmente la malla con el número de capas limitado a un valor determinado, es necesario recordar que lo que se busca una malla con elemento anisótropos en la región cerca de la superficie y que estos vayan creciendo hasta tener elementos isotrópicos, para que se pueda continuar con la malla de tetraedros con una transición suave. En cambio, en la nueva malla, la diferencia en el tamaño de elemento entre los prismas y los tetraedros es notable, y solo se justifica por el hecho de que estos elementos se encuentran en el interior, ya que el principal motivo es evaluar el flujo de aire alrededor del vehículo.

## 7. Análisis de la malla

### 7.1. Malla de superficie

La evaluación de la malla de superficie se realiza de dos maneras, la primera es comparándola con una malla realizada mediante el software OpenFoam por el fabricante, para lo que se utiliza el software PARAVIEW y generar las normales de las superficies, la figura 7.1, es obtenida con esta técnica y pertenecen a la malla obtenida con ANSA.

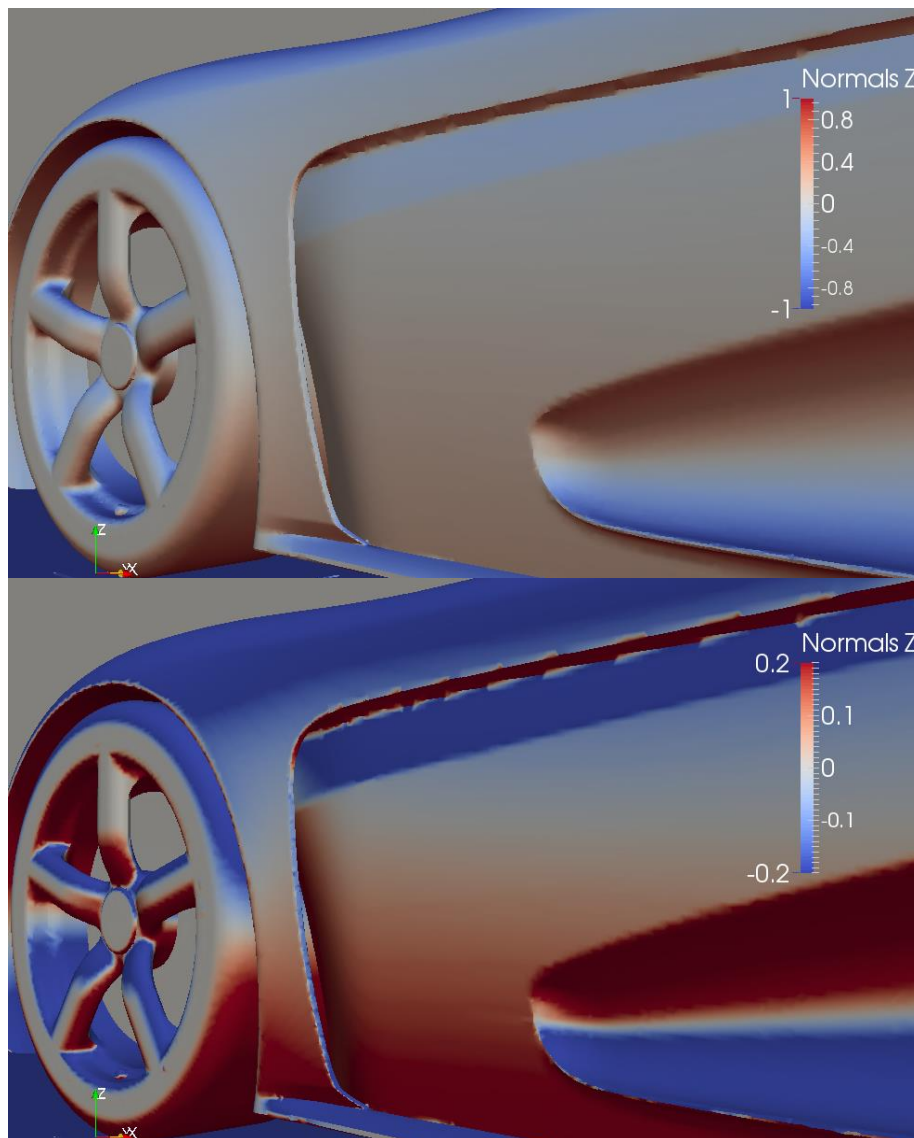


**Figura 7.1.** Representación de normales de superficie.

El software calcula las normales de las celdas de la malla de superficie y las representa con color azul las que se alinean con el eje Z positivo, y de color rojo con el eje Z negativo.

Puede ser que la escala con la que se visualiza las normales no sea suficiente para apreciar algunos cambios sutiles en la superficie, y por lo tanto necesiten que la escala se reduzca. En

la figura 7.2 se puede ver el efecto de reducir la escala de las normales en la malla obtenida mediante OpenFoam, y con esto, apreciar que tan bien se representan las superficies curvas.



**Figura 7.2.** Reducción de escala de representación de normales.

En los anexos se muestra la comparativa de la malla obtenida en este proyecto con la proporcionada por el fabricante, incluyendo tomas de la malla.

Otra forma de evaluar la malla, es por medio de estadísticas de los criterios de calidad que se pueden obtener directamente con el software.

### 7.1.1. Tamaño de elemento

ELEMENT's SIDE LENGTH	CQUAD4	CTRIA3	POLYGON	ALL
MIN	0	0.980207	0	
MEAN	0	9.09522	0	9.09522
MAX	0	507.703	0	

**Tabla 7.1.** Reporte resumido del tamaño de los elementos de superficie.

### 7.1.2. Criterios de calidad

SHELL Elements OUT of Thresholds			
Quality criterion	Elms Off	Perc(%)	Threshold
EQUIAREA SKEWNESS [FLUENT]	15	0.000	0.7
Trias > Maximum EQUIANGLE SKEWNESS [FLUENT]	13	0.000	0.7
Total Trias Angle Off	13	0.000	
Total Shells Angle Off	13	0.000	
Total Shell Elements OFF	15	0.000	
Total Shell Elements	2148764		

**Tabla 7.2.** Reporte resumido de criterios de calidad de malla de superficie.

El detalle de los distintos criterios de calidad se muestra en las tablas 7.3, 7.4 y 7.5. Los gráficos de los criterios también se muestran en las figuras 7.3, 7.4 y 7.5.

## 7.1.2.1. Shell Skewness Quality EQUIAREA SKEWNESS [FLUENT]

Shell Skewness Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
168325					2.98731e-11	
ID of Element with max value					MAX Value	
310713					0.922245	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	-∞	To:	0	0	0
2	From:	0	To:	0.1	1923440	89.5138
3	From:	0.1	To:	0.2	136027	6.33048
4	From:	0.2	To:	0.3	59162	2.7533
5	From:	0.3	To:	0.4	17677	0.822659
6	From:	0.4	To:	0.5	8072	0.375658
7	From:	0.5	To:	0.6	4281	0.199231
8	From:	0.6	To:	0.7	90	0.00418845
9	From:	0.7	To:	0.8	11	0.000511922
10	From:	0.8	To:	0.9	3	0.000139615
11	From:	0.9	To:	0.92	0	0
12	From:	0.92	To:	0.95	1	4.65384e-05
13	From:	0.95	To:	0.98	0	0
14	From:	0.98	To:	0.99	0	0
15	From:	0.99	To:	0.999	0	0
16	From:	0.999	To:	1	0	0
17	From:	1	To:	+∞	0	0
Out of any class range					0	0
TOTAL					2148764	

Tabla 7.3. Detalle de criterio de calidad "skewness".

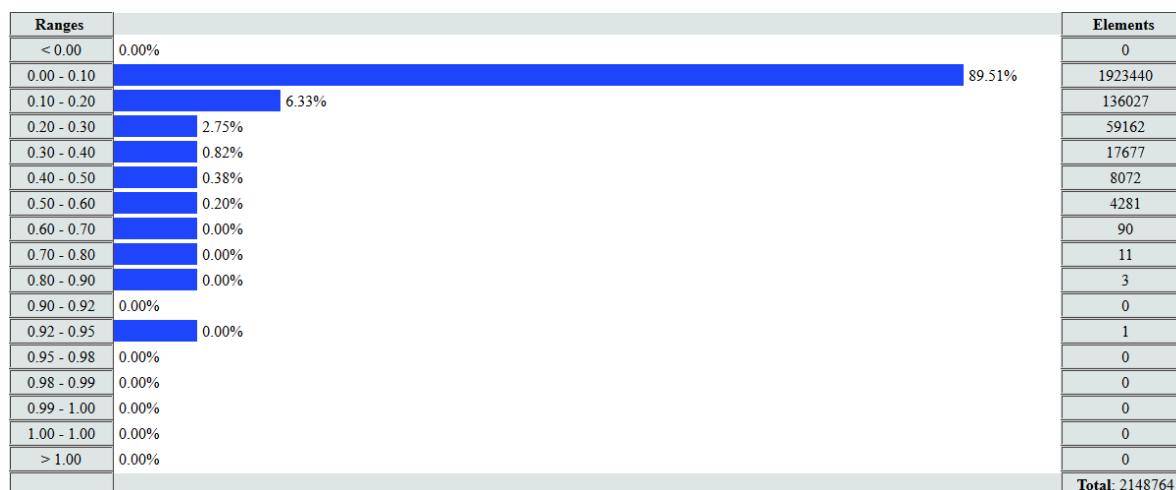
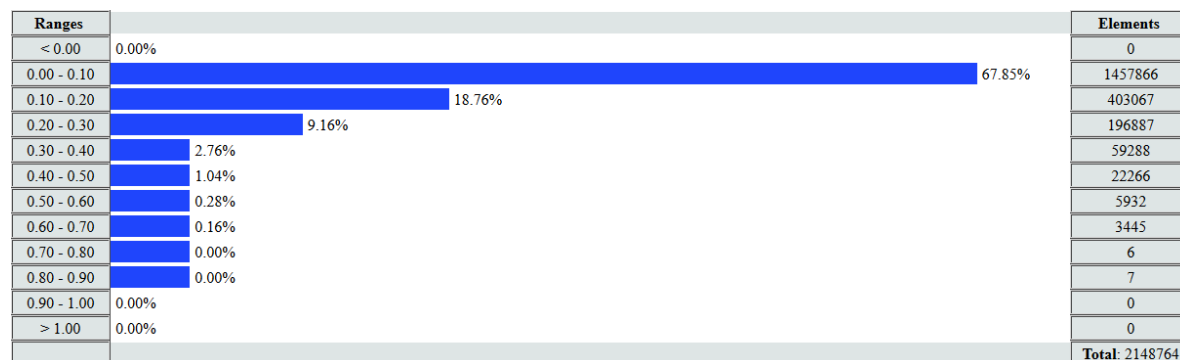


Figura 7.3. Gráfica de criterio "skewness" de la malla de superficie.

### 7.1.2.2. Max. Angle Tria(s) Quality Trias > Maximum EQUIANGLE SKEWNESS [FLUENT]

Max. Angle Tria(s) Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
168325					4.37517e-06	
ID of Element with max value					MAX Value	
686873					0.866258	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	-∞	To:	0	0	0
2	From:	0	To:	0.1	1457866	67.8467
3	From:	0.1	To:	0.2	403067	18.7581
4	From:	0.2	To:	0.3	196887	9.1628
5	From:	0.3	To:	0.4	59288	2.75917
6	From:	0.4	To:	0.5	22266	1.03622
7	From:	0.5	To:	0.6	5932	0.276066
8	From:	0.6	To:	0.7	3445	0.160325
9	From:	0.7	To:	0.8	6	0.00027923
10	From:	0.8	To:	0.9	7	0.000325769
11	From:	0.9	To:	1	0	0
12	From:	1	To:	+∞	0	0
Out of any class range					0	0
TOTAL					2148764	

**Tabla 7.4.** Detalle de criterio de ángulo máximo.



**Figura 7.4.** Gráfica de criterio de ángulo máximo de la malla de superficie.

### 7.1.2.3. Shell Minimum Length Quality

Shell Minimum Length Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
459904					0.980207	
ID of Element with max value					MAX Value	
2179152					445.035	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	-∞	To:	0.1	0	0
2	From:	0.1	To:	0.2	0	0
3	From:	0.2	To:	0.3	0	0
4	From:	0.3	To:	0.4	0	0
5	From:	0.4	To:	0.5	0	0
6	From:	0.5	To:	0.6	0	0
7	From:	0.6	To:	0.7	0	0
8	From:	0.7	To:	0.8	0	0
9	From:	0.8	To:	0.9	0	0
10	From:	0.9	To:	1	610	0.0283884
11	From:	1	To:	+∞	2148154	99.9716
Out of any class range					0	0
TOTAL					2148764	

Tabla 7.5. Detalle de criterio de calidad "skewness".

Ranges		Elements
< 0.10	0.00%	0
0.10 - 0.20	0.00%	0
0.20 - 0.30	0.00%	0
0.30 - 0.40	0.00%	0
0.40 - 0.50	0.00%	0
0.50 - 0.60	0.00%	0
0.60 - 0.70	0.00%	0
0.70 - 0.80	0.00%	0
0.80 - 0.90	0.00%	0
0.90 - 1.00	0.03%	610
> 1.00	99.97%	2148154
		Total: 2148764

Figura 7.5. Gráfica de tamaño de elementos de la malla de superficie.

De acuerdo a las gráficas existen 15 elementos que incumplen el criterio de skewness, 13 que sobrepasan el criterio de ángulo máximo, de un total de 2148764 celdas. Y, por otro lado, el elemento de menor tamaño es de 0.98 que está bastante cerca del tamaño mínimo deseado de 1, por lo tanto, se da por aceptada la malla de superficie.

## 7.2. Malla de volumen

Los resultados que se muestran a continuación muestran los criterios de calidad de la malla de volumen, que considera la malla prismática y la tetraédrica.

### 7.2.1. Tamaño de elementos

SOLID ELEMENT's SIDE LENGTH	TETRA	PENTA	PYRAMID	HEXA	POLYHEDRAL	ALL
MIN	0.196544	0.215145	0.196544	0	0	
MEAN	18.0231	5.91277	4.5309	0	0	12.7153
MAX	830.896	504.971	20.4136	0	0	

**Tabla 7.6.** Reporte resumido del tamaño de elementos de volumen.

### 7.2.2. Parámetros de Calidad

SOLID Elements OUT of Thresholds			
Quality criterion	Elms Off	Perc(%)	Threshold
EQUIVOLUME SKEW. [FLUENT]	3	0.000	0.98
SQUISH	0	0.000	0.98
Total Tetras Angle Off	3057	0.009	0.98
Total Pentas Angle Off	0	0.000	0.98
Total Solids Angle Off	3057	0.009	
Total Solids Elements OFF	3	0.000	
Total Solid Elements	33839091		

**Tabla 7.7.** Reporte resumido de criterios de calidad de malla de volumen.

El detalle de los criterios de calidad se muestra desde la tabla 7.8 a la 7.11. Los gráficos de los criterios también se muestran desde la figura 7.6 a la 7.8.



## 7.2.2.1. Solid Skewness (Tetras only) Quality EQUIVOLUME SKEW. [FLUENT]

Solid Skewness (Tetras only) Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
15910441					2.70965e-07	
ID of Element with max value					MAX Value	
15768096					0.99166	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	-∞	To:	0	0	0
2	From:	0	To:	0.1	2877308	12.9239
3	From:	0.1	To:	0.2	4872449	21.8855
4	From:	0.2	To:	0.3	5624627	25.264
5	From:	0.3	To:	0.4	4701912	21.1195
6	From:	0.4	To:	0.5	2784555	12.5073
7	From:	0.5	To:	0.6	1075498	4.83079
8	From:	0.6	To:	0.7	247821	1.11313
9	From:	0.7	To:	0.8	50586	0.227216
10	From:	0.8	To:	0.9	20930	0.0940108
11	From:	0.9	To:	0.92	2437	0.0109462
12	From:	0.92	To:	0.95	3417	0.0153481
13	From:	0.95	To:	0.98	1852	0.00831859
14	From:	0.98	To:	0.99	2	8.98336e-06
15	From:	0.99	To:	0.999	1	4.49168e-06
16	From:	0.999	To:	1	0	0
17	From:	1	To:	+∞	0	0
Out of any class range					0	0
TOTAL					22263395	

Tabla 7.8. Detalle de criterio de calidad “skewness”, malla de volumen.

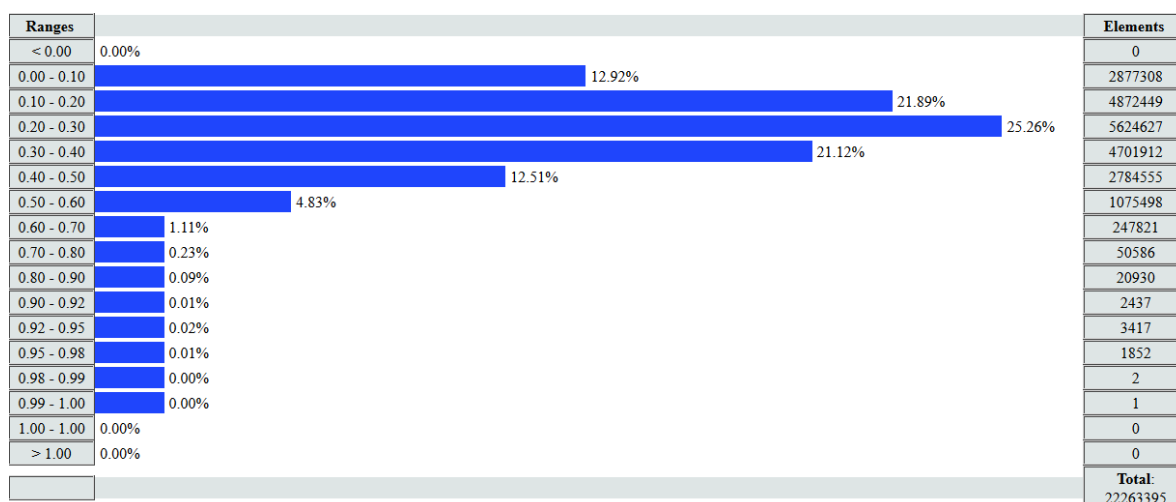


Figura 7.6. Gráfica de criterio “Skewness” de la malla de volumen.

### 7.2.2.2. Solid Squish Quality SQUISH

Solid Squish Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
12416463					5.78773e-10	
ID of Element with max value					MAX Value	
8733213					0.953416	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	$-\infty$	To:	0	0	0
2	From:	0	To:	0.1	16108405	47.6029
3	From:	0.1	To:	0.2	10319725	30.4965
4	From:	0.2	To:	0.3	5100436	15.0726
5	From:	0.3	To:	0.4	1779459	5.25859
6	From:	0.4	To:	0.5	432725	1.27877
7	From:	0.5	To:	0.6	45633	0.134853
8	From:	0.6	To:	0.7	25477	0.0752887
9	From:	0.7	To:	0.8	17327	0.0512041
10	From:	0.8	To:	0.9	9412	0.027814
11	From:	0.9	To:	0.92	354	0.00104613
12	From:	0.92	To:	0.95	135	0.000398947
13	From:	0.95	To:	0.98	3	8.86549e-06
14	From:	0.98	To:	0.99	0	0
15	From:	0.99	To:	0.999	0	0
16	From:	0.999	To:	1	0	0
17	From:	1	To:	$+\infty$	0	0
Out of any class range					0	0
TOTAL					33839091	

Tabla 7.9. Detalle de criterio de calidad “squish”, malla de volumen.

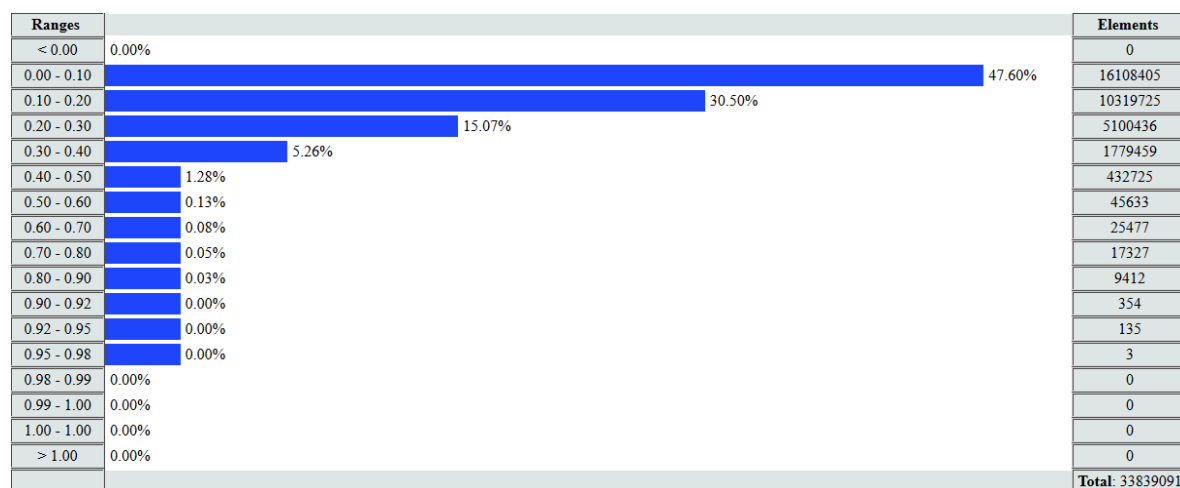


Figura 7.7. Gráfica de criterio “Squish” de la malla de volumen.

## 7.2.2.3. Max. Angle Penta(s) Quality

Max. Angle Penta(s) Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
3292672					2.23882e-05	
ID of Element with max value					MAX Value	
2404459					0.979848	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	$-\infty$	To:	0	0	0
2	From:	0	To:	0.1	3930434	33.9542
3	From:	0.1	To:	0.2	2559078	22.1073
4	From:	0.2	To:	0.3	2078306	17.954
5	From:	0.3	To:	0.4	1432863	12.3782
6	From:	0.4	To:	0.5	978606	8.45397
7	From:	0.5	To:	0.6	408143	3.52586
8	From:	0.6	To:	0.7	114391	0.9882
9	From:	0.7	To:	0.8	35906	0.310184
10	From:	0.8	To:	0.9	31624	0.273193
11	From:	0.9	To:	0.92	4149	0.0358423
12	From:	0.92	To:	0.95	2010	0.017364
13	From:	0.95	To:	0.98	186	0.00160681
14	From:	0.98	To:	0.99	0	0
15	From:	0.99	To:	0.999	0	0
16	From:	0.999	To:	1	0	0
17	From:	1	To:	$+\infty$	0	0
Out of any class range					0	0
TOTAL					11575696	

Tabla 7.10. Detalle de criterio de calidad de ángulo máximo, malla de volumen.

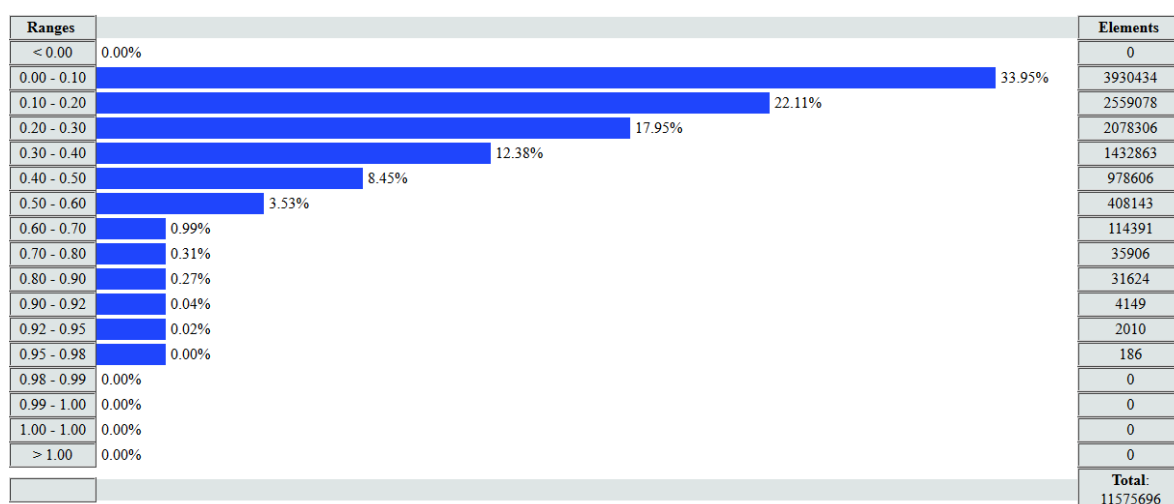


Figura 7.8. Gráfica de criterio de ángulo máximo de la malla de volumen.

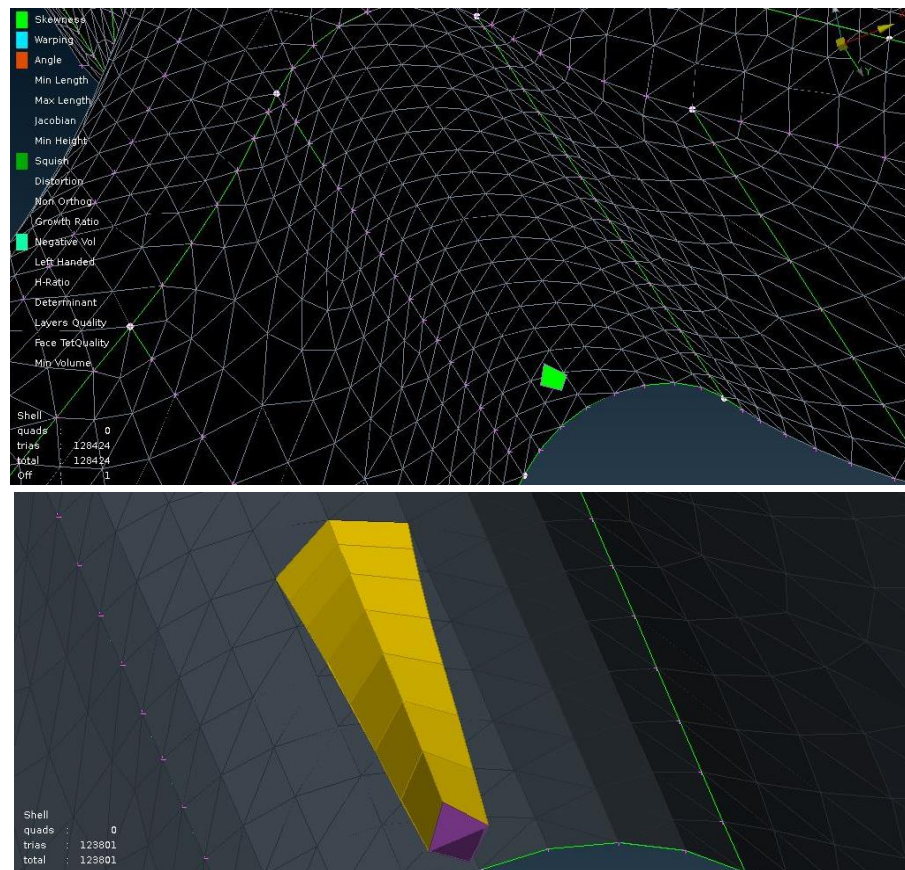
#### 7.2.2.4. Solid Minimum Length Quality

Solid Minimum Length Table						
ID of Element with min value					MIN Value	
10411647					0.196544	
ID of Element with max value					MAX Value	
37137195					550.352	
Class					No of Elements	Perc(%)
1	From:	$-\infty$	To:	0.1	0	0
2	From:	0.1	To:	0.2	6	1.7731e-05
3	From:	0.2	To:	0.3	244	0.00072106
4	From:	0.3	To:	0.4	2836	0.00838084
5	From:	0.4	To:	0.5	3590	0.010609
6	From:	0.5	To:	0.6	12851	0.0379768
7	From:	0.6	To:	0.7	17354	0.0512839
8	From:	0.7	To:	0.8	25934	0.0766392
9	From:	0.8	To:	0.9	49115	0.145143
10	From:	0.9	To:	1	824977	2.43794
11	From:	1	To:	$+\infty$	32902184	97.2313
Out of any class range					0	0
TOTAL					33839091	

**Tabla 7.11.** Detalle del tamaño de los elementos, malla de volumen.

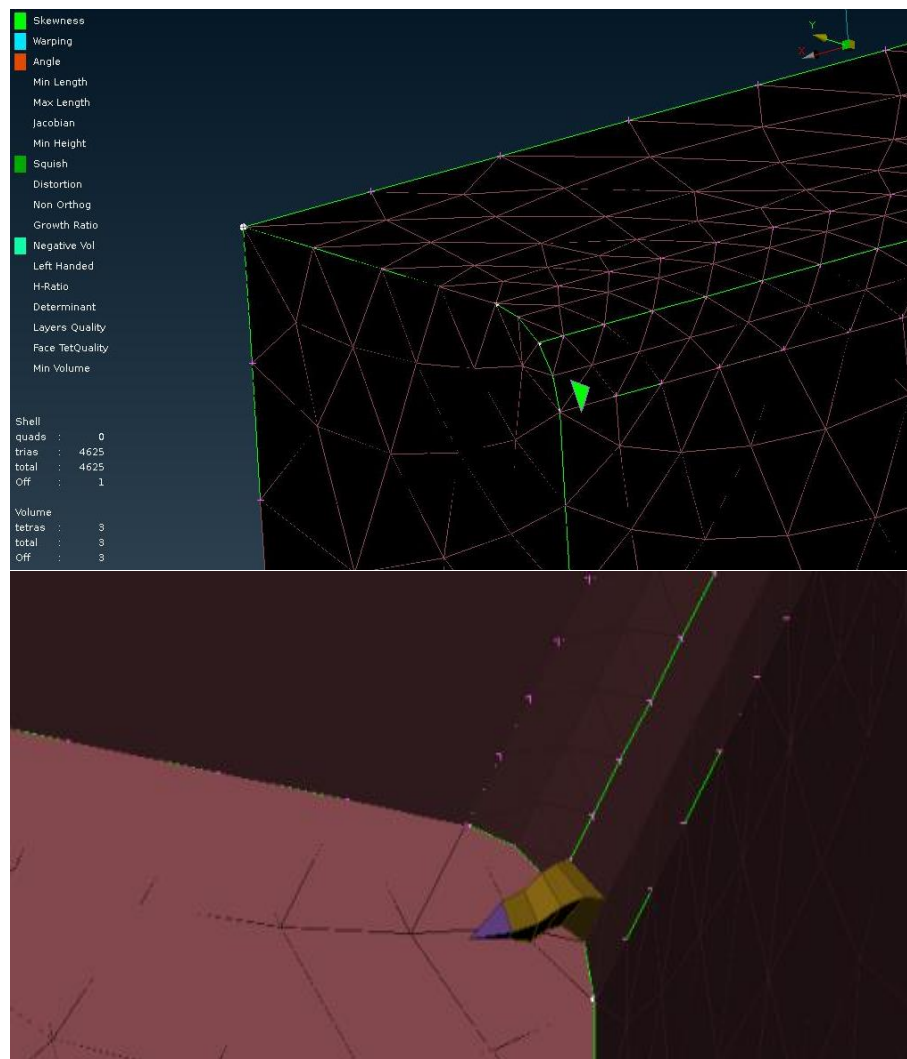
Los resultados nos indican que el tamaño de elemento mínimo que se consigue es de 0.196544, valor bastante alejado al que se había plantado como objetivo. Por otro lado, en lo que respecta a los criterios de calidad, se puede ver que no existen elementos con volumen negativo, ni elementos que incumplan el criterio de ángulo máximo, ni squish, y que 3 elementos incumplan el criterio de skewness. A estos tres elementos se los localizó y se los muestra en las siguientes imágenes

El primero se encuentra en la rueda delantera.

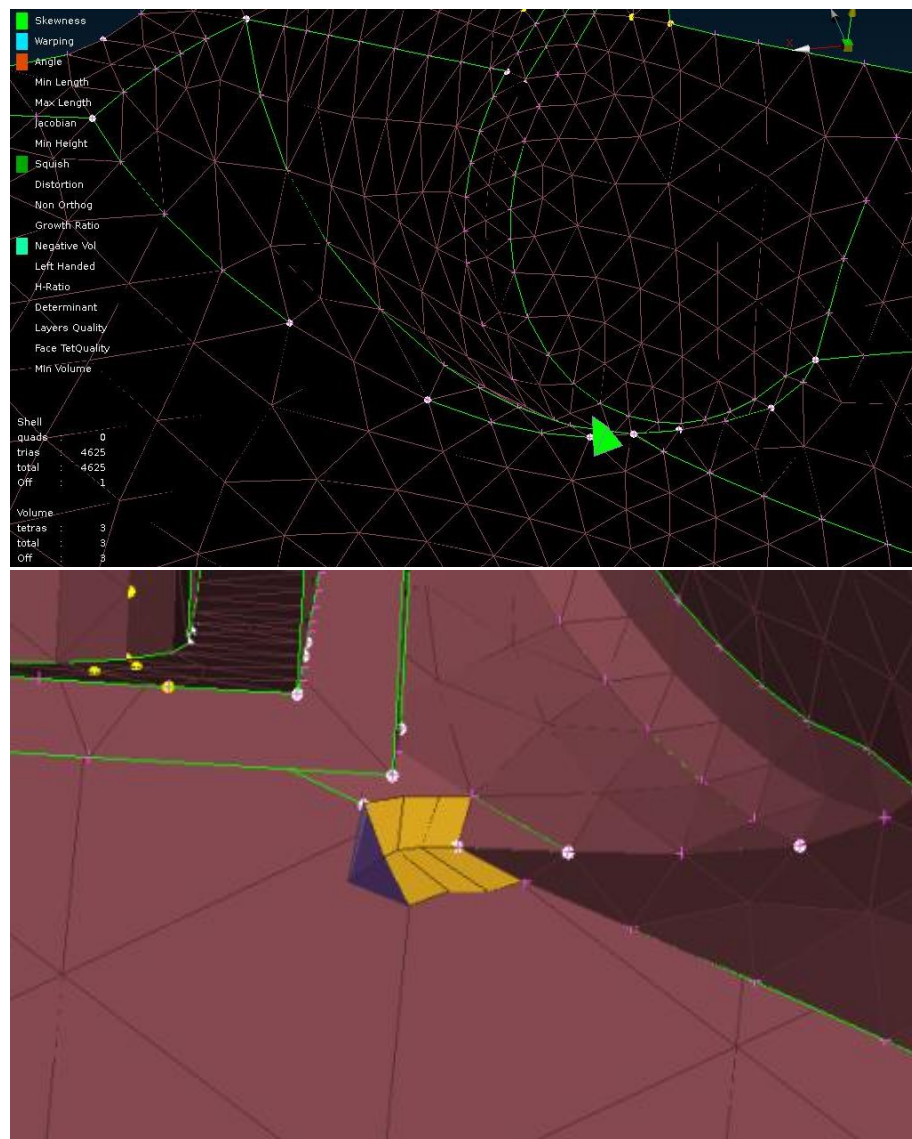


**Figura 5.9.** Localización de elementos que exceden criterios de calidad, rueda de vehículo.

Y los otros se encuentran ambos en la zona del interior del motor



**Figura 5.10.** Localización de elementos, interior del vehículo.



**Figura 5.11.** Localización de elementos, interior del vehículo.





## 8. Presupuesto

La estimación del presupuesto relacionado a la realización del proyecto se realiza de la siguiente manera.

- El tiempo dedicado a la obtención del modelo se obtiene del diagrama de actividades. Obteniendo un total de 960 horas.
- La estimación de los recursos utilizados durante este periodo.
  - Software Ansa: 900 € (Licencia anual) (0.46875 €/hora).
  - Software Paraview: Licencia Libre.
- El salario de un Ingeniero por el tiempo dedicado a la actividad.
  - Salario: 25 €/hora

Por lo tanto, el coste total se obtiene de la siguiente tabla.

CONCEPTO	Tiempo (horas)	Coste (€/hora)	Total (€)
Software Ansa	960	0,46875	450
Software Paraview	0	0	0
Ingeniero	960	25	24000
COSTE TOTAL			24450 €



## 9. Impacto Ambiental

Dentro del estudio de la mecánica de fluidos se menciona a la simulación CFD como una herramienta indispensable en la actualidad, que contribuye tanto, a los centros de desarrollo de productos, como a los centros de investigación. En este sentido la simulación LES aporta información del flujo adicional que permite comprender con más detalle el comportamiento del flujo alrededor de un cuerpo, y se diferencia de las herramientas de simulación tradicionales.

El proyecto que se presenta está orientado hacia la simulación numérica, por lo tanto, el impacto ambiental que se pueda relacionar a su desarrollo corresponde a las horas de ensayo que se evitan en el túnel de viento para estudiar el flujo alrededor de un vehículo, ya que cada vez las simulaciones son más precisas, se debe recordar la referencia [11], pues, en ella se menciona que durante la realización de una simulación LES, se logró predecir el coeficiente de sustentación en un vehículo de competición con un margen del 1% respecto a los ensayos en el túnel de viento.



## 10. Cronograma de Actividades

ACTIVIDADES	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Investigación	■	■	■	■	■		
Aprendizaje del software	■	■	■				
Creación de malla de superficie		■	■	■			
Evaluación y corrección de malla de superficie				■	■		
Obtención de imágenes Paraview					■		
Creación de malla de volumen					■	■	
Evaluación y corrección de malla de volumen						■	■
Obtención de imágenes							■
Desarrollo de la memoria					■	■	■





## Conclusiones

Una vez finalizado el presente proyecto, se puede concluir que se consiguieron los objetivos planteados, pues principalmente se pudo evaluar un software comercial con la creación de una malla para una simulación específica. El propósito de un programa comercial es de ofertar las herramientas para la creación de mallas para cualquier solicitud, ya sean simulaciones mecánicas se análisis estructural o de mecánica de fluidos, por lo tanto, deben ser versátiles de tal manera que el proceso de mallado no sea un inconveniente y termine dificultando la labor de los centros de ingeniería. Con esto en mente, las herramientas a las que se tiene acceso permiten modificar parámetros y obtener distintos resultados de la malla y verificar si se cumple los objetivos requeridos.

El aprendizaje del funcionamiento del software se pudo efectuar mediante los tutoriales y al soporte del usuario al que se tiene acceso con la licencia del producto, con lo que se pudo sobrellevar los retos que se presentaban durante el tiempo de aprendizaje.

Si se realiza una pausa en la malla de superficie y se observa los resultados que se obtienen, la primera conclusión a la que se llega es que se logró gestionar el proceso de mallado de tal forma que se pudo controlar el tamaño del elemento sin renunciar a la capacidad de capturar detalles de la superficie. Para validar los resultados que se obtuvieron, se hizo uso de la malla utilizada por el fabricante en una simulación similar, para realizar una comparativa, factor que ayuda a generar confianza en los resultados obtenidos.

Sin embargo, se insiste en que tanto los métodos, como los elementos utilizados en los dos procesos son distintos, por lo que se puede entender el origen de los resultados obtenidos. A esto se debe sumar el hecho que la malla obtenida con Open Foam fue utilizada en una simulación LES con tratamiento implícito, y por tanto el tamaño de elemento no tiene el mismo efecto en el coste computacional que tiene en la simulación con tratamiento explícito, por tal motivo se obvió esa información.

Como se puede ver en el apartado del mallado de volumen, primero, el tamaño de elementos que se obtienen no llega a estar cerca del valor objetivo, el cual es 1 mm, debido a que el software realiza un movimiento de los nodos en áreas conflictivas para no conseguir elementos de mala calidad. Y por otro lado existen lugares en los que la creación de la malla prismática colapsa localmente, debido a que no existe espacio suficiente para crear los elementos con las características establecidas o porque no se puede calcular un vector normal a la celda apropiado.

La utilización de los criterios de calidad fue de gran ayuda ya que sirvió de gran ayuda para detectar elementos distorsionados con errores fatales, y encaminó el proceso a obtener

elementos con figuras regulares. De forma general se puede decir que existe conformidad con la malla obtenida debido a que los elementos que sobrepasan los criterios de calidad establecidos son pocos y se encuentran en el interior del compartimento motor, y el principal objetivo de la simulación es evaluar el flujo del aire en el exterior del vehículo. Sin embargo, no se puede dejar pasar por alto el hecho que se menciona en la referencia [10], donde, a criterio del autor, se dice que no existe justificación a base de un cálculo matemático para demostrar el valor límite de la calidad de los elementos, y se recuerda que los valores que se utilizaron son sugeridos por el software, para el programa de simulación CFD, Fluent.

Finalmente, se menciona que los procesos de mallado habitualmente son iterativos, y que, una vez realizada la simulación, se realizan distintos cálculos para confirmar que el cálculo numérico sea el adecuado en las celdas, respecto a este punto se hace referencia en el apartado de tamaño de elemento en el que se muestra el método al que se debe referir la evaluación de la resolución de la malla obtenida, por lo que la malla obtenida está sujeta a evaluaciones posteriores.

## Agradecimientos

Inicialmente, al profesor Emilio Hernández Chiva del departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción del ETSEIB, quien propuso el desarrollo de este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña, que me formó a través de su programa Maestría en Ingeniería de la Automoción.

Al Centro de Supercomputación de Barcelona, por la apertura que brinda a alumnos de distintos ámbitos de la ingeniería para que desarrollen proyectos en sus instalaciones. El hecho de tener acceso a herramientas de simulación muy útiles, y contar con el apoyo de su personal con amplios conocimientos y experiencia en los respectivos campos, hacen que la experiencia de desarrollar un proyecto fin de carrera, sea magnífica. En este aspecto, aunque se menciona que el aprendizaje del software de mallado se realizó mediante los tutoriales incluidos en la licencia del software, nada de eso hubiera sido posible sin las conversaciones diarias con Herbert y Samuel, pues guiaron continuamente mi proceso de aprendizaje con críticas constructivas, y con paciencia supieron ayudarme cuando más lo necesité.

Y a lo más importante, a mi familia, por su apoyo incondicional que alentó a mi desarrollo profesional y personal, así como también a los amigos que indirectamente ayudaron a conseguir esta meta personal.



## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] ANDERSON, J. D. *Computational Fluid Dynamics. The basics with applications*. International edition. 1995.
- [2] BAKKER, A. Applied computational fluid dynamics [Fecha de consulta: 15 de Junio de 2017] <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>.
- [3] BETA CAE Systems. *CFD Batch Meshing of a Fuel Pump*. Tutorial ANSA v17.1.
- [4] BETA CAE Systems. *External Aerodynamics, Hybrid volumen mesh*. Tutorial ANSA v17.1.
- [5] BETA CAE Systems. *The Basics, Geometry cleanup and shell meshing*. Tutorial ANSA v17.1.
- [6] BETA CAE Systems. *User's Guide*. ANSA v17.1. 2017.
- [7] FRÖHLICH, J. Rody, W. *Introduction to Large Eddy Simulation of Turbulent Flows*. Closure Strategies for turbulent and Transitional flows. Cambridge University Press. 2002.
- [8] GÖDE, E. *Performance Upgrading of Hydraulic Machinery with the Help of CFD*. 100 Volumes of 'Notes on Numerical Fluid Mechanics'. Springer. 2009.
- [9] KAJISHIMA, T. TAIRA K. *Computational fluid dynamics. Incompressible turbulent flows*. Springer. 2017.
- [10] KNUPP, P. *Remarks on Mesh Quality*. AIAA. 2007.
- [11] KOBAYSAHI, T. TSUBOKURA, M. *CFD Application in Automotive Industry*. 100 Volumes of 'Notes on Numerical Fluid Mechanics'. Springer. 2009.
- [12] KRAJNOVIĆ, S. *What Can LES Do in Vehicle Aerodynamics?*. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Volume 79. 2016.
- [13] MASDEMONT, J. *Curs d'elements finits amb aplicacions*. Primera edición. 2002.
- [14] ÖSTH, J. KRAJNOVIĆ, S. *A LES Study of a Simplified Tractor-Trailer Model*. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Volume 79. 2016.
- [15] PASCAL, J. F., GEORGE, P. L. *Mesh generation application to finite elements*. Segunda edición. 2008.
- [16] STIMPSON, C., et. al. *The Verdict Geometric Quality Library*. Sandia National

Laboratories, 2007.

- [17] TSUBOKURA, M. NAKASHIMA, T. SASAKI, I. KITOH, K. *On the Unsteady Aerodynamic Forces Acting on a Formula Car in a Wind Gust*. AIAA. 2009.